Série de la Protection de l'environnement

Estimation des émissions de gaz provoquant l'effet de serre au Canada en 1990

Rapport SPE 5/AP/4
Décembre 1992

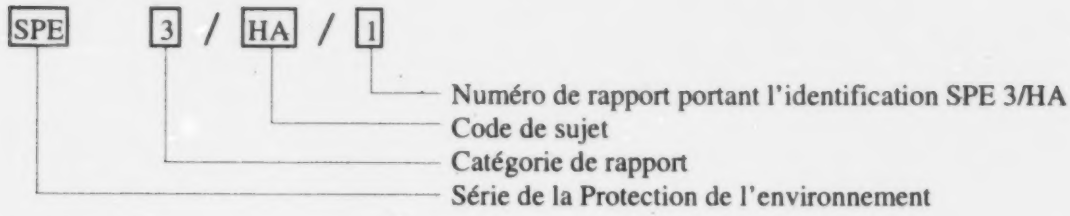
Canada

Environnement Canada | Environment Canada

93-02263/

SÉRIE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Exemple de numérotation :



Catégories

1 Règlements/Lignes directrices/ Codes de pratiques
2 Évaluation des problèmes et options de contrôle
3 Recherche et développement technologique
4 Revues de la documentation
5 Inventaires, examens et enquêtes
6 Évaluations des impacts sociaux, économiques et environnementaux
7 Surveillance
8 Propositions, analyses et énoncés de principes généraux
9 Guides

Sujets

AG Agriculture
AN Technologie anaérobie
AP Polluants atmosphériques
AT Toxicité aquatique
CC Produits chimiques commerciaux
CE Consommateurs et environnement
CI Industries chimiques
FA Activités fédérales
FP Traitement des aliments
HA Déchets dangereux
IC Chimie inorganique
MA Pollution marine
MM Exploitation minière et traitement des minéraux
NR Régions du Nord et rurales
PF Papier et fibres
PG Production d'électricité
PN Pétrole et gaz naturel
RA Réfrigération et climatisation
RM Méthodes de référence
SF Traitements de surface
SP Déversements de pétrole et de produits chimiques
SRM Méthodes de référence normalisées
TS Systèmes de transport
TX Textiles
UP Pollution urbaine
WP Protection/préservation du bois

Des sujets et des codes additionnels sont ajoutés au besoin. On peut obtenir une liste des publications de la SPE en s'adressant aux Publications de la Protection de l'environnement, Conservation et Protection, Environnement Canada, Ottawa (Ontario) K1A 0H3.

Printed on recycled paper

Imprimé sur du papier recyclé

Estimation des émissions de gaz provoquant l'effet de serre au Canada en 1990

A.P. Jaques
Protection de l'environnement
Conservation et Protection
Environnement Canada

Rapport SPE 5/AP/4
Décembre 1992

DONNÉES DE CATALOGAGE AVANT PUBLICATION (CANADA)

Jaques, A. P.

Estimation des émissions de gaz provoquant l'effet de serre au Canada en 1990

(Rapport ; SPE 5/AP/4)
Publ. aussi en anglais sous le titre: Canada's greenhouse gas emissions, estimates for 1990.
Publ. par Conservation et Protection.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 0-662-97967-2
N° de cat. MAS En-49-5/5-4F

1. Pollution -- Canada -- Mesure. 2. Gaz carbonique -- Aspect de l'environnement -- Canada. 3. Chlorofluocarbones -- Aspect de l'environnement -- Canada. 4. Méthane -- Aspect de l'environnement -- Canada. 5. Oxyde azoteux -- Aspect de l'environnement -- Canada. I. Canada. Environnement Canada. II. Canada. Conservation et protection. III. Coll.: Rapport (Canada. Environnement Canada) ; SPE 5/AP/4.

TD883.7C3J6314 1992 363.72'8 C93-099402-7

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1992
No de catalogue En 49-5/5-4F
ISBN 0-662-97967-2
IMPRIMERIE BEAUREGARD LIMITÉE

Commentaires

Les personnes qui désirent faire part de leurs commentaires sur la teneur du présent rapport sont priées de s'adresser à :

A.P. Jaques
Protection de l'environnement
Conservation et Protection
Environnement Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0H3

This report is also available in English under the title *Canada's Greenhouse Gas Emissions: Estimates for 1990*. For copies, please contact:

Environmental Protection Publications
Conservation and Protection
Environment Canada
Ottawa, Ontario
K1A 0H3

Résumé

Le présent rapport renferme des estimations des émissions de dioxyde de carbone, de méthane, d'oxyde de diazote et de chlorofluorocarbures, pour l'année 1990 au Canada. Certaines de ces estimations présentent de nombreuses incertitudes et lacunes. Il est nécessaire de poursuivre les travaux pour s'assurer de l'identification de toutes les sources et pour vérifier les estimations actuelles. Toutes les méthodes utilisées pour déterminer les émissions de même que les limites de ces méthodes sont décrites. Les sources des estimations comprennent des rapports et des articles scientifiques, des bilans matières, des calculs d'ingénierie et des jugements formulés selon les règles de l'art. Les émissions sont classées selon les sources, le secteur d'activité, la province et le type de carburant ou de combustible. Même si ces estimations sont considérées comme les plus dignes de confiance pour le moment, elles ne sont pas immuables et elles peuvent être corrigées à la lumière de données plus récentes et meilleures.

Abstract

Estimates of emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and chlorofluorocarbons released to the environment in Canada in 1990 are summarized in this report. It is acknowledged that there are still many uncertainties and gaps surrounding some of the emissions estimates. Further work is necessary to ensure that all potential sources are identified and to verify existing source estimates. All methods used to develop the emissions estimates, and the limitations of these methods, are described. Sources for the estimates include published reports and scientific papers, mass balance, engineering calculations, and engineering judgement. Emissions have been classified by source, sector, province, and fuel type. Although these estimates are considered the best available at this time, they may change when more recent or better data are developed.

Table des matières

Résumé v
Abstract vi
Liste des tableaux x
Liste des figures xiv
Remerciements xv
Sommaire xvi

Section 1
Introduction 1
1.1 Le dioxyde de carbone 1
1.2 Le méthane 3
1.3 L'oxyde de diazote 5
1.4 Précision des estimations 5
1.5 Potentiels de réchauffement planétaire 6

Section 2
Émissions de dioxyde de carbone 8
2.1 Procédés industriels 8
2.1.1 Cimenteries 8
2.1.2 Fours à chaux 9
2.1.3 Fabrication de l'ammoniac 9
2.1.4 Utilisations non énergétiques 11
2.1.5 Dioxyde de carbone extrait du gaz naturel 11
2.2 Foyers fixes de combustion 12
2.2.1 Centrales électriques 12
2.2.2 Foyers de combustion 12
2.3 Carburants (moyens de transport) 13
2.3.1 Véhicules routiers à essence 13
2.3.2 Véhicules routiers à moteur diesel 16
2.3.3 Consommation non routière de l'essence 16
2.3.4 Aéronefs 17
2.3.5 Transport ferroviaire 17
2.3.6 Transport sur l'eau 17
2.3.7 Autres véhicules à moteur diesel 17
2.3.8 Autres carburants 17
2.3.9 Sources diverses 17
2.4 Recommandations de travaux ultérieurs 18

Section 3

Sources et puits de dioxyde de carbone dans la biomasse 19
3.1 Le secteur forestier canadien 20
3.2 Les sources 22
3.2.1 Liqueurs noires et déchets de bois écrasés 22
3.2.2 Brûlage dirigé 22
3.2.3 Incendies de forêt 22
3.2.4 Bois de chauffage 24
3.2.5 Incinération 24
3.2.6 Décharges municipales 25
3.3 Puits 27

Section 4

Émissions de méthane 28
4.1 Sources anthropiques 28
4.1.1 Extraction du charbon 28
4.1.2 Exploitation du pétrole et du gaz d'amont 31
4.1.3 Distribution du gaz naturel 31
4.1.4 Utilisation des combustibles et des carburants 33
4.1.5 Incinération 37
4.1.6 Décharges municipales 37
4.1.7 Animaux domestiques 40
4.1.8 Fumier 42
4.1.9 Brûlage dirigé 43
4.2 Sources naturelles 43
4.2.1 Terres humides 43
4.2.2 Incendies de forêt 45
4.2.3 Faune 45

Section 5

Émissions d'oxyde de diazote 47
5.1 Sources anthropiques 47
5.1.1 Sources de combustion 47
5.1.2 Fabrication de l'acide nitrique 51
5.1.3 Fabrication de l'acide adipique 51
5.1.4 Utilisation des engrais 51
5.1.5 Sources diverses 52
5.2 Sources naturelles 52

Section 6

Émissions halogénées **56**
6.1 Les chlorofluorocarbures **56**
6.1.1 Scénarios des émissions **56**
6.2 Les hydrochlorofluorocarbures **59**
6.3 Le tétrachlorure de carbone **59**
6.4 Le méthylchloroforme **59**
6.5 Le tétrafluorométhane et l'hexafluoroéthane **59**

Section 7

Méthode de calcul des émissions de dioxyde de carbone **60**
7.1 Combustibles gazeux **60**
7.1.1 Gaz naturel **60**
7.2 Combustibles liquides **61**
7.3 Combustibles solides **64**
7.3.1 Charbons **64**
7.3.2 Bois et ordures **67**
7.4 Procédés industriels **68**
7.4.1 Cimenteries et fours à chaux **68**
7.4.2 Emplois non énergétiques du charbon, du coke et du coke de pétrole **69**

Références **72**

Liste des tableaux

S.1 Sommaire des émissions nationales (1990) xix

S.2 Sommaire des émissions de dioxyde de carbone au Canada, en 1990 (kilotonnes) xx

S.3 Coefficients d'émission des gaz exerçant un effet de serre xxi

1 Potentiels directs de réchauffement planétaire des gaz traces 7

2 Émissions de dioxyde de carbone selon la source 9

3 Sources et puits de carbone au Canada (quantités annuelles) 10

4 Consommation de combustible dans les sources fixes (1990) 13

5 Consommation d'essence et de gazole par les véhicules automobiles (1990) 16

6 Bilan du carbone dans le secteur forestier canadien 21

7 Composition des liqueurs noires 23

8 Quantités de combustible consumé du fait du brûlage dirigé 23

9 Émissions de dioxyde de carbone attribuables aux incendies de forêt 24

10 Vitesses de production de gaz dans les décharges 26

11 Sommaire des émissions de méthane au Canada 28

12 Émissions estimatives de méthane des mines à ciel ouvert 30

13 Émissions de méthane des mines souterraines 32

14 Émissions de méthane attribuables à l'exploitation pétrolière et gazière d'amont, en Alberta 33

15 Fuites de méthane accompagnant la distribution du gaz naturel 34

16 Coefficients d'émission du méthane - véhicules automobiles 35

17 Répartition des véhicules dotés de catalyseurs au Canada (1990) 36

18 Exemple de calcul des émissions de méthane des automobiles à essence 36

19 Coefficients d'émission des autres moyens de transport 36

20 Coefficients d'émission du méthane dans les sources fixes 38

21 Émissions de méthane attribuables à la combustion du bois de chauffage 39

22 Valeurs signalées de la capacité de production de méthane des déchets 41

23 Émissions de méthane dans les lieux d'enfouissement de chaque province (1990) 42

24 Production de méthane par les animaux domestiques (1990) 43

25 Émissions de méthane dues aux déjections animales 44

26 Combustibles consumés au cours de brûlages dirigés 46

27 Flux de méthane des écosystèmes à terres humides 46

28 Émissions de méthane dues aux incendies de forêt 46

29 Sommaire des émissions d'oxyde de diazote au Canada (1990) 48

30 Intervalle des coefficients d'émission de l'oxyde de diazote **49**

31 Coefficients d'émission de l'oxyde de diazote imputables aux combustibles et aux carburants fossiles..... **50**

32 Masses volumiques utiles à la conversion des volumes en masses **50**

33 Calcul des émissions d'oxyde de diazote imputables aux véhicules automobiles **52**

34 Pourcentage d'engrais azotés dégagé sous forme d'oxyde de diazote **53**

35 Pertes d'azote sous forme d'oxyde de diazote subies par les engrais azotés minéraux, dans les provinces du Canada (1989) **54**

36 Flux annuels d'oxyde de diazote au Canada (kg de N/km^2)..... **55**

37 Rejets de chlorofluorocarbures au Canada (1990)..... **58**

38 Composition du gaz naturel (pourcentage par volume) **62**

39 Pouvoir calorifique moyen du gaz naturel sec **62**

40 Contenu énergétique brut du gaz naturel (MJ/m^3)..... **62**

41 Coefficients d'émission du dioxyde de carbone des combustibles gazeux **63**

42 Densité, masse volumique et contenu énergétique de certains combustibles et carburants..... **64**

43 Consommation de combustibles liquides au Canada (1985)..... **65**

44 Coefficients d'émission du dioxyde de carbone..... **65**

45 Coefficients d'émission du CO_2 attribuables aux charbons..... **66**

46 Caractéristiques des charbons consommés au Canada **67**

47 Production d'huile légère et de goudron à partir du charbon, dans les cokeries **68**

48 Besoins en matières et en énergie pour la production d'une tonne d'ammoniac liquide **70**

49 Sources industrielles des émissions de dioxyde de carbone **71**

Liste des figures

S.1 Répartition des émissions de dioxyde de carbone selon les sources (1990) ..... **xvii**

S.2 Répartition des émissions de méthane selon les sources (1990) ..... **xvii**

S.3 Répartition des émissions d'oxyde de diazote selon les sources (1990) ..... **xviii**

S.4 Répartition des émissions de chlorofluorocarbures selon les sources (1990) ..... **xviii**

1 Émissions de gaz à effet de serre au Canada **3**

2 Répartition des émissions de dioxyde de carbone selon les pays **4**

3 Répartition des émissions de dioxyde de carbone entre les divers moyens de transport **14**

4 Bilan du carbone dans le secteur forestier canadien **21**

5 Répartition des émissions de méthane entre les divers moyens de transport (1990) **37**

6 Répartition des émissions de méthane selon le type d'animal **44**

Remerciements

La première ébauche du présent rapport a été publiée en février 1991. En avril 1992, sa version révisée a été diffusée. Des observations et des renseignements communiqués au plus tard le 1er décembre 1992 ont été intégrés à la version finale, que voici.

Parmi les nombreuses personnes et les nombreux organismes qui ont fait connaître leurs commentaires et qui ont transmis des renseignements, je suis particulièrement redevable à Maria Wellisch, de MacMillan Bloedel, qui a fait une révision complète de l'ébauche et des observations très utiles; à Don Wilson, de Statistique Canada, pour sa patience et pour ses connaissances approfondies des statistiques sur le secteur énergétique canadien; aux ministères provinciaux de l'Énergie et de l'Environnement, particulièrement à ceux de la Colombie-Britannique et de l'Ontario; à Roger Larson et à Gordon Collis, de l'Institut canadien des engrais, qui ont transmis des observations et qui ont estimé les émissions de l'industrie des engrais; à Mike Apps et à Steve Taylor, de Forêts Canada; à Henry Hengeveld, du Service de l'environnement atmosphérique, pour ses connaissances et ses conseils; à Bruce Stewart, des Laboratoires de recherche sur le charbon, d'Énergie, Mines et Ressources Canada, qui m'a transmis des estimations des dégagements de méthane dans les mines de charbon du Canada; à Al Coombs, du même ministère, qui s'est assuré de la concordance des émissions de base des prévisions de son ministère et de nos estimations pour l'année de référence; à Steve Graham, qui a mis au point un système informatisé; sans oublier l'Association canadienne de l'électricité, l'Association pétrolière du Canada, l'Association canadienne du gaz et la Canadian Aluminum Association.

Sommaire

Le présent rapport est un inventaire des sources anthropiques du dioxyde de carbone (CO_2), du méthane (CH_4) et de l'oxyde de diazote (N_2O), dégagés dans l'environnement sous forme gazeuse. Il renferme, en outre, des estimations des émissions de cinq chlorofluorocarbures (les CFC-11, -12, -113, -114, -115) de même que de certains de leurs produits de remplacement. Pour les besoins du rapport, les émissions sont définies comme des rejets gazeux dans l'atmosphère et elles sont exprimées selon leurs formules moléculaires complètes.

Les émissions de CO_2, de CH_4, de N_2O et de CFC au Canada, en 1990, sont présentées au tableau S.1. Les émissions de CO_2, selon le secteur d'activité et la province, sont ventilées au tableau S.2. Les coefficients d'émission qui ont servi de base au calcul des estimations sont présentés au tableau S.3. Les figures S.1 à S.4 montrent la quantité d'émissions de chaque gaz, pour chaque source importante.

En 1990, 461 Mt (millions de tonnes métriques) de dioxyde de carbone ont été rejetées dans l'atmosphère au Canada, soit environ 2 % des émissions planétaires de ce gaz. L'emploi des combustibles fossiles est responsable de 94 % de cette quantité. La part des moyens de transport se situe à environ 32 %, celle de la production d'électricité, à 20 %, et celle des sources industrielles, à 17 %. Le reste est attribuable à divers procédés industriels et procédés de chauffage. La principale source de méthane est constituée des lieux d'enfouissement, qui contribuent à environ 38 % de toutes les émissions de ce gaz, chiffrées à environ 3,7 Mt. Les autres sources importantes sont l'exploitation pétrolière et gazière (29 %), le bétail (27 %), les mines de charbon (4 %) et les sources diverses (1 %). Les émissions totales d'oxyde de diazote, estimées à 92 kt (kilotonnes), sont dues à l'utilisation des combustibles (52 %), à la fabrication de l'acide adipique et de l'acide nitrique (34 %), aux engrais (12 %) et à des sources diverses (2 %).

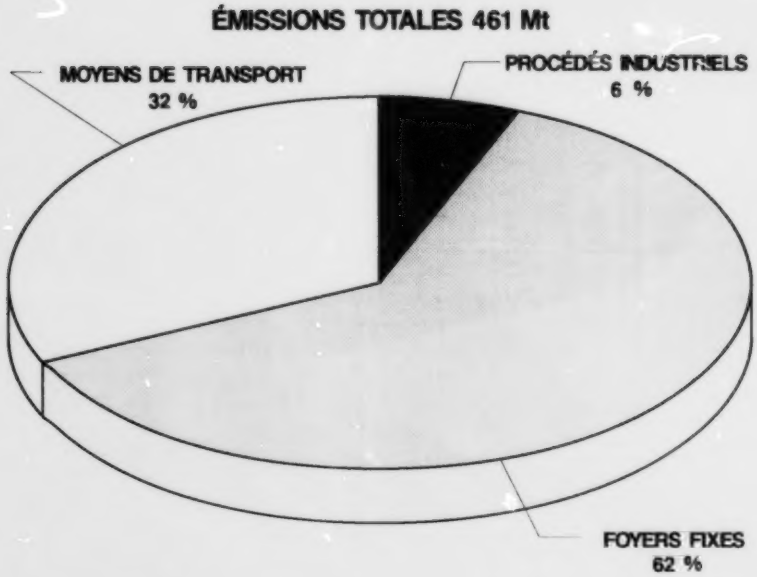


Figure S.1 Répartition des émissions de dioxyde de carbone selon les sources (1990)

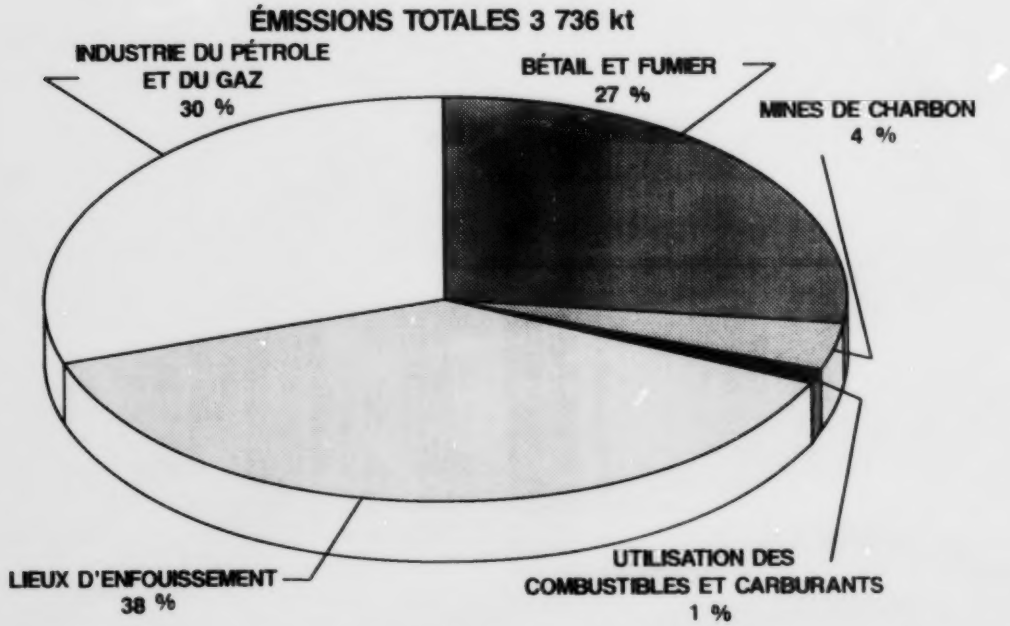


Figure S.2 Répartition des émissions de méthane selon les sources (1990)

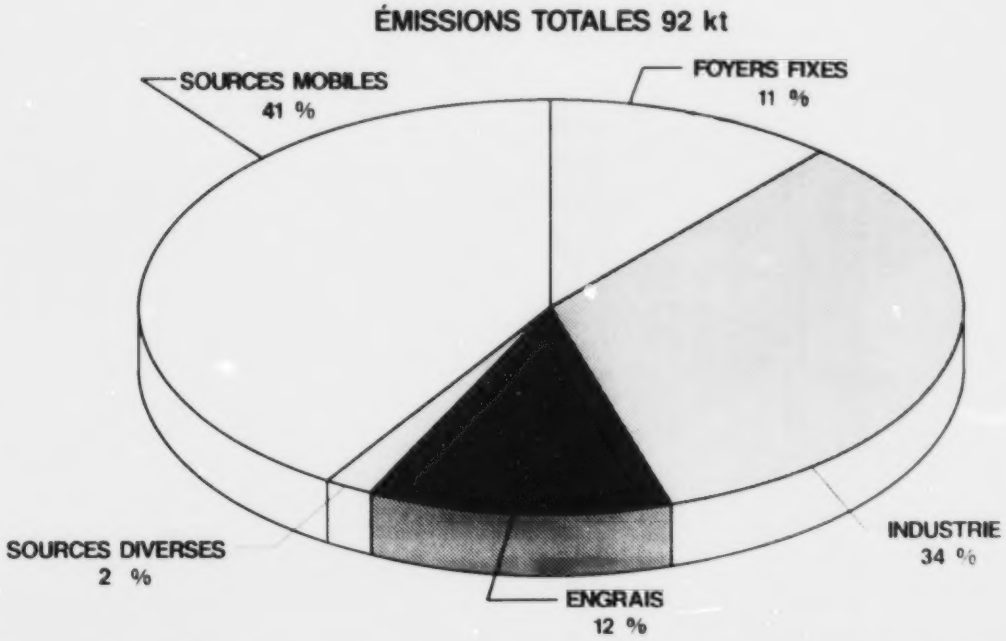


Figure S.3 Répartition des émissions d'oxyde de diazote selon les sources (1990)

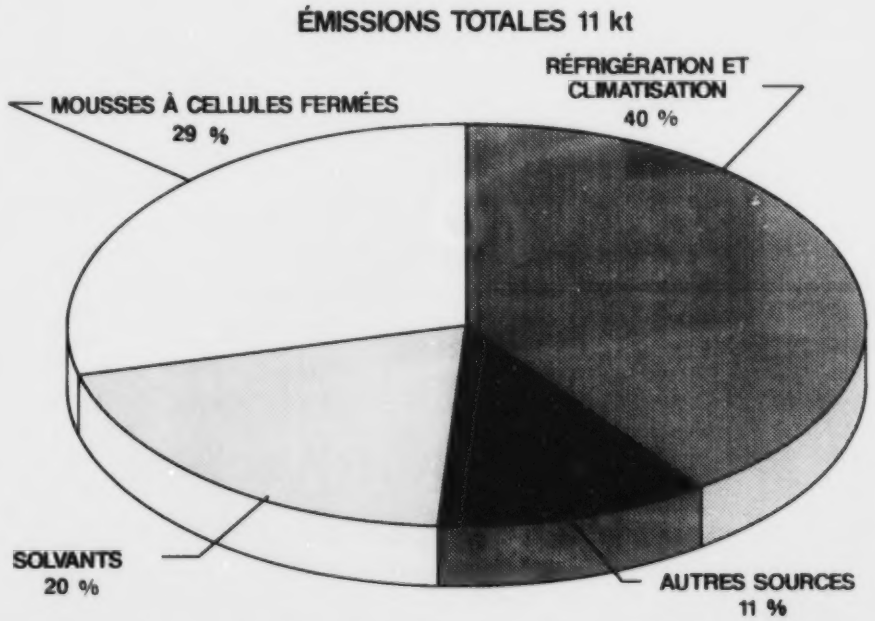


Figure S.4 Répartition des émissions de chlorofluorocarbures selon les sources (1990)

Tableau S.1 Sommaire des émissions nationales (1990)

Source	CO_2	CH_4	N_2O	CFC
Procédés industriels				
Production d'amont de pétrole et de gaz	7 569[a]	1 100	-	-
Distribution du gaz naturel	?	18	-	-
Cimenteries et fours à chaux	7 666	-	-	-
Utilisations non énergétiques	13 620	-	-	-
Mines de charbon	-	143	-	-
Industrie chimique	?	?	31	<1
Total partiel	**28 856**	**1 261**	**31**	**<1**
Foyers de combustion				
Centrales d'électricité	93 873	1	2	-
Foyers industriels	75 350	3	2	-
Foyers résidentiels	40 733	2	2	-
Foyers commerciaux	23 984	1	<1	-
Autres	52 667	<1	<1	-
Bois de chauffage	25 000[b]	1	3	-
Liqueurs noires	28 000[b]	-	-	-
Total partiel	**286 607[c]**	**8**	**9**	**-**
Carburants				
Automobiles	49 019	10	20	-
Utilitaires légers mus à l'essence	23 094	5	9	-
Utilitaires lourds mus à l'essence	2 235	<1	<1	-
Motocyclettes	149	<1	<1	-
Autres	7 292	1	1	-
Utilitaires légers à moteur diesel	136	<1	<1	-
Véhicules lourds à moteur diesel	21 410	2	3	-
Autres à moteur diesel	14 363	1	2	-
Aéronefs	13 137	1	1	-
Chemins de fer	6 315	<1	1	-
Navires et embarcations	7 782	<1	1	-
Total partiel	**144 931[c]**	**23**	**38**	**-**
Incinération				
Rebuts de bois	7 500[b]	1	?	-
Autres boues municipales raffinées ou résiduaires	1 370[b]	<1	?	-
Total partiel	**0[c]**	**1**	**-**	**-**
Agriculture				
Bétail et fumier	34 600[c]	1 000	-	-
Emploi des engrais	-	-	11	-
Changement d'occupation des sols	?	?	-	-
Total partiel	**0[c]**	**1 000**	**11**	**-**
Sources diverses				
Brûlage dirigé	8 600[b]	38	1	-
Lieux d'enfouissement	3 870[b]	1 405	-	-
Emploi des CFC	-	-	-	11
Anesthésiques	-	-	2	-
Total partiel	**0[c]**	**1 443**	**3**	**11**
Total national	**460 394[c]**	**3 736**	**92**	**11**

[a] Tous les chiffres en kt/a
[b] Biomasse
[c] À l'exclusion de la biomasse

Remarque : Les totaux peuvent ne pas être entièrement exacts, car les chiffres ont été arrondis.

Tableau S.2 Sommaire des émissions de dioxyde de carbone au Canada, en 1990 (kilotonnes)

Secteur	T.-N.	I.-P.-É.	N.-É.	N.-B.	Qc	Ont.	Man.	Sask.	Alb.	C.-B.	T.N.-O.	Canada	% du total
INDUSTRIES													
Cimenteries	58	0	173	0	1 443	2 540	115	58	750	635	0	5 772	1,25
Fours à chaux	0	0	0	95	322	1 089	66	0	133	189	0	1 894	0,41
Dégazage du gaz naturel	0	0	0	0	0	25	0	379	6 459	705	2	7 569	1,64
Utilisations non énergétiques	336	3	100	47	1 894	3 808	54	237	6 545	592	4	13 620	2,96
Total partiel	**394**	**3**	**273**	**142**	**3 659**	**7 461**	**236**	**674**	**13 886**	**2 122**	**6**	**28 856**	**6,27**
COMBUSTIBLES ET CARBURANTS													
Sources fixes													
Centrales d'électricité	1 631	102	6 873	5 895	1 430	25 935	492	10 277	39 704	1 227	307	93 873	20,39
Habitations	694	354	1 986	943	6 092	16 452	1 606	2 064	6 411	3 986	144	40 733	8,85
Commerces	247	130	590	563	3 876	8 398	1 398	960	4 850	2 825	146	23 984	5,21
Industries	1 024	37	717	1 404	13 790	33 204	1 313	2 633	13 804	7 322	103	75 350	16,37
Agriculture	25	20	106	54	301	806	52	298	513	300	3	2 478	0,54
Administrations publiques	76	39	219	170	379	616	33	85	175	84	187	2 063	0,45
Production de vapeur	0	2	0	142	0	181	45	0	10	0	0	379	0,08
Produits raffinés	0	0	0	0	0	44	0	0	302	0	0	345	0,08
Auto-utilisation:													
Gaz naturel	0	0	0	0	0	0	0	2 438	21 936	1 865	136	26 376	5,73
RPP	1 044	1	685	917	2 324	5 274	9	241	2 529	1 078	13	14 116	3,07
Charbon	0	0	3	0	0	0	0	1	15	226	0	245	0,05
Pipelines	0	0	0	0	25	2 194	818	1 583	1 228	817	0	6 665	1,45
Total partiel	**4 742**	**685**	**11 180**	**10 087**	**28 217**	**93 105**	**5 767**	**20 581**	**91 476**	**19 729**	**1 038**	**286 607**	**62,25**
Moyens de transport													
Essence													
Automobiles	864	274	1 649	1 401	10 514	18 018	1 994	2 362	6 647	5 152	143	49 019	10,65
Utilitaires légers	407	129	777	660	4 953	8 489	940	1 113	3 132	2 427	67	23 094	5,02
Utilitaires lourds	39	12	75	64	479	822	91	108	303	235	7	2 235	0,49
Motocyclettes	3	1	5	4	32	55	6	7	20	16	0	149	0,03
Total, essence	1 313	416	2 506	2 129	15 978	27 383	3 031	3 590	10 102	7 830	217	74 497	16,18
Gazole													
Utilitaires légers	2	0	4	5	32	45	5	4	21	16	1	136	0,03
Utilitaires lourds	378	74	670	821	5 030	7 064	782	665	3 236	2 581	109	21 410	4,65
Autres	350	60	450	343	1 930	2 703	1 022	2 088	3 135	2 005	278	14 363	3,12
Total, gazole	730	135	1 124	1 170	6 991	9 811	1 810	2 757	6 391	4 602	388	35 909	7,80
Véhicules routiers													
Gaz naturel	0	0	0	0	9	39	0	0	38	45	0	131	0,03
Véhicules motorisés													
Propane													
Véhicules motorisés	1	1	6	6	65	647	43	37	439	309	1	1 554	0,34
Total, véhicules routiers	2 044	552	3 636	3 305	23 043	37 880	4 883	6 384	16 971	12 786	606	112 090	24,35
Hors-route													
Chemins de fer	0	0	60	118	518	1 622	552	533	1 603	1 308	2	6 315	1,37
Bateau et embarcations	750	84	1 036	439	1 879	1 490	0	0	0	2 104	0	7 782	1,69
Aéronefs	921	14	500	91	2 643	3 731	518	254	1 773	2 468	223	13 137	2,85
Essence, hors-route	99	31	189	160	1 203	2 061	228	270	760	589	16	5 607	1,22
Total, hors-route	1 770	130	1 784	808	6 243	8 904	1 298	1 058	4 136	6 469	242	32 841	7,13
Total partiel	**3 814**	**682**	**5 420**	**4 113**	**29 286**	**46 784**	**6 182**	**7 441**	**21 107**	**19 255**	**847**	**144 931**	**31,48**
TOTAL	**8 950**	**1 370**	**16 873**	**14 343**	**61 162**	**147 351**	**12 184**	**28 696**	**126 470**	**41 105**	**1 891**	**460 394**	**100,00**

Remarque : Les totaux peuvent ne pas être entièrement exacts, car les chiffres ont été arrondis.

Tableau S.3 Coefficients d'émission des gaz exerçant un effet de serre

	CO_2		CH_4		N_2O	
SOURCES DE COMBUSTION[a]						
Combustibles gazeux	(t/ML)[b]	(t/TJ)	(kg/ML)	(kg/TJ)	(kg/ML)	(kg/TJ)
Gaz naturel	1,88	49,68	(4,8-48)	(0,13-1,27)	0,02	0,62
Gaz de distillation	2,07	49,68	-	-	0,02	0,62
Gaz de cokerie	1,60	86,00	-	-	-	-
Combust. et carb. liquides	(t/kL)	(t/TJ)	(kg/kL)	(kg/TJ)	(kg/kL)	(kg/TJ)
Essence à moteur	2,36	67,98	(0,24-4,20)	(6,92-121,11)	(0,23-1,65)	(6,6-47,60)
Kérosène	2,55	67,65	0,21	5,53	0,23	6,10
Essence d'aviation	2,33	69,37	2,19	60,00	0,23	6,86
Gaz de pétrole liquéfiés	(1,11-1,76)	(59,84-61,38)	0,03	1,18	0,23	(9,00-12,50)
Gazole	2,73	70,69	(0,06-0,25)	(1,32-5,7)	(0,13-0,40)	(3,36-10,34)
Huile légère	2,83	73,11	(0,01-0,21)	(0,16-5,53)	(0,13-0,40)	(3,36-10,34)
Huile lourde	3,09	74,00	(0,03-0,12)	(0,72-2,88)	(0,13-0,40)	(3,11-9,59)
Carburéacteur	2,55	70,84	0,08	2,00	0,23	6,40
Coke de pétrole	4,24	100,10	0,02	0,38	-	-
Combustibles solides	(t/t)	(t/TJ)	(g/kg)	(kg/TJ)	(g/kg)	(kg/TJ)
Anthracite	2,39	86,20	0,02	variable	(0,1-2,11)	variable
Charbon bitumineux américain	(2,46-2,50)	(81,6-85,9)	0,02	variable	(0,1-2,11)	variable
Charbon bitumineux canadien	(1,70-2,52)	(94,3-83,0)	0,02	variable	(0,1-2,11)	variable
Charbon subbitumineux	1,74	94,30	0,02	variable	(0,1-2,11)	variable
Lignite	(1,34-1,52)	(93,8-95,0)	0,02	variable	(0,1-2,11)	variable
Coke	2,48	86,00	-	-	-	-
Bois de chauffage	1,47	81,47	(0,15-0,5)	(0,01-0,03)	0,16	8,89
Brûlage des rémanents	1,47	81,47	0,15	0,01		
Incinération - déchets urbains	0,91	85,85	0,23	0,02		
- déchets de bois	1,50	83,33	0,15	0,01		
SOURCES INDUSTRIELLES	(t/t)	(t/TJ)	(g/kg)	(t/TJ)	(g/kg)	(kg/TJ)
Cimenteries	0,50	-	-	-	-	-
Fours à chaux	0,79	-	-	-	-	-
Usines d'ammoniac	1,58	-	-	-	-	-
Liqueurs noires	1,43	102,01	-	-		
Usines d'acide adipique	-	-	-	-	0,03	-
Fabrication de l'oxyde de diazote	-	-	-	-	(2,0-20)	-
Fabrication du gaz naturel	0,07	-	2,67	-	-	-
Mines de charbon			(1,20-16,45)	-	-	-
Emplois non énergétiques	(t/kL)	(t/TJ)				
Matières premières de la pétrochimie	0,50	14,22	-	-	-	-
Naphtas	0,50	14,22	-	-	-	-
Huiles de graissage	1,41	36,01	-	-	-	-
Autres produits	1,45	28,88	-	-	-	-
Coke	2,48 (t/ML)	86,00	-	-	-	-
Gaz naturel	1,26	33,35	-	-	-	-
Gaz de cokerie	1,6	86,00	-	-	-	-
Agriculture	(kg · tête^{-1} · a^{-1})		(k · tête^{-1} · a^{-1})		(g/kg)	(kg/TJ)
Bétail	(36 - 3 960)	-	(0,01-120)	-	-	-
Emploi des engrais	-	-	-	-	(1 - 50)	-
Divers	(kg/t)		(kg/t)		(g/kg)	(kg/TJ)
Lieux d'enfouissement	182,00		66,00	-	-	-

[a] Remarque : Lorsque le coefficient d'émission est exprimé sous forme d'intervalle, consulter le rapport pour obtenir des précisions.

[b] Les préfixes M (méga ou $\times 10^6$), G (giga ou $\times 10^9$) et T (téra ou $\times 10^{12}$) du SI sont systématiquement employés dans le présent rapport.

Section 1

Introduction

L'objet premier du présent rapport est d'identifier et de quantifier les sources anthropiques (dues à l'activité de l'homme) des rejets atmosphériques de gaz exerçant un *effet de serre*. Même si un certain nombre de gaz influent sur le bilan radiatif de la planète, il est difficile de quantifier avec certitude les effets indirects de certains d'entre eux, notamment des précurseurs de l'ozone [oxydes d'azote (NO_x); autres hydrocarbures que le méthane (HCNM); monoxyde de carbone (CO)]. De fait, en ce qui concerne les NO_x, l'incertitude empêche de déterminer dans quel sens s'exercent ces effets (GIEC, 1992). Le présent rapport ne renferme donc pas d'estimations des émissions des trois gaz susmentionnés.

Les gaz qui influent directement sur le bilan du rayonnement et qui sont examinés dans les pages qui suivent sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'oxyde de diazote (N_2O). Le document présentera un sommaire des émissions au Canada, en 1990, ainsi que la méthode de leur estimation. Pour certains des principaux gaz halogénés, c'est-à-dire les chlorofluorocarbures (CFC), le méthylchloroforme (CH_3CCl_3) et le tétrachlorure de carbone (CCl_4), les estimations sont *préliminaires*. En outre, on a dressé pour le Canada un *bilan du carbone*, incomplet cependant, à l'aide des renseignements disponibles sur les sources et les causes de disparition (puits) de cet élément.

La base de ces estimations provient de rapports publiés, de communications scientifiques, de communications personnelles, de calculs techniques, de bilans matières ainsi que de jugements portés selon les règles de l'art. Pour 1990, ces estimations ne sauraient être définitives. Pour certains gaz, notamment le méthane et l'oxyde de diazote, les intervalles des estimations sont très larges, tandis que des sources connues n'ont fait l'objet d'aucune estimation. On s'efforce d'améliorer les estimations à la faveur des travaux actuels et prévus de recherche, y compris : une vérification des concentrations élevées d'oxyde de diazote libérées par les vieux catalyseurs trifonctionnels; des mesures supplémentaires des émissions de méthane des lieux d'enfouissement; des mesures du méthane dégagé par les terres humides du bassin de la baie d'Hudson; une recherche sur le stockage et les transferts d'azote dans les sols; une amélioration du bilan national du carbone de Forêts Canada; une recherche sur le rôle des océans à l'égard du dioxyde de carbone; un dégagement possible de méthane des retenues de barrages. Certains de ces travaux sont parrainés par Environnement Canada, dans le cadre du programme d'évaluation et de communication de données sur les émissions des gaz à effet de serre (Finlay, 1992).

1.1 Le dioxyde de carbone

La concentration de ce gaz atmosphérique mineur varie naturellement en fonction des fluctuations de l'activité biologique. Or, si les processus naturels de dégagement et de destruction sont plus ou moins en équilibre, la surveillance de la composition de l'atmosphère révèle un accroissement de la concentration de CO_2, qui se superpose aux fluctuations saisonnières. La contribution de l'homme, due à l'utilisation des combustibles fossiles, à l'exploitation forestière et à l'agriculture, suffit plus qu'amplement à expliquer cet accroissement (Pales et Keeling, 1965; Robinson et Robbins, 1972; GIEC, 1992). La concentration

atmosphérique [environ 355 parties par million (ppm) en volume, en 1991, (GIEC, 1992) dépasse d'environ 27 % les 280 ppm de l'ère préindustrielle] et elle s'accroît au rythme d'environ 1,8 ppm par année (environ 3,8 Gt de carbone), du fait du déséquilibre entre l'utilisation des combustibles fossiles et les émissions dues au changement du mode d'occupation des terres, d'une part, et entre l'absorption océanique et terrestre, d'autre part. Même si on n'a pas pu dresser un bilan équilibré du carbone, les estimations actuelles des émissions planétaires se situent à 6,0 ± 0,5 Gt de carbone (imputables à l'utilisation des combustibles fossiles, à la fabrication du ciment et de la chaux) et à 1,6 ± 1,0 Gt [dues au changement des modes d'occupation des sols, au déboisement surtout (Marland, 1992; GIEC, 1992)]. On estime que les océans en absorberaient 2,0 ± 0,8 Gt nettes. La différence entre l'accumulation atmosphérique et ces flux constitue le piège ou le puits manquant, que l'on pense être la biosphère terrestre (GIEC, 1992).

Le dioxyde de carbone et les autres gaz atmosphériques piègent la chaleur entre la surface du sol et la haute atmosphère. Ce pouvoir d'absorption, le fameux effet de serre, maintient la surface de la planète à 33 °C au-dessus de la température calculée d'après l'énergie irradiée de la terre (Schneider, 1989). Le dioxyde de carbone est l'un des principaux gaz à absorber dans l'infrarouge (4,2 à 4,8 µm; 9,1 à 11,8 µm et 12,5 à 18,2 µm) (Wuebbles et Edmonds, 1987).

Le dioxyde de carbone et tous les gaz naturels de l'atmosphère n'absorbent pas tout le rayonnement infrarouge. Ils sont relativement transparents aux longueurs d'onde de 7 à 12 µm, mais d'autres gaz (méthane, oxyde de diazote et les CFC) absorbent fortement dans cet intervalle (Electric Power Research Institute, 1986).

Au Canada, le dioxyde de carbone est le principal gaz à effet de serre : il absorbe environ 70 %* du rayonnement IR absorbé par tous les gaz à effet de serre émis (*cf.* figure 1). Cette estimation repose sur l'hypothèse que les effets directs et indirects du CH_4 s'équivalent à peu près. Pour tous les autres gaz, on n'a utilisé que le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) direct sur 100 ans. La section 2 servira à décrire et à quantifier les principales sources d'émission, et la section 7 présentera les méthodes qui ont permis de calculer les coefficients d'émission du dioxyde de carbone.

Même si la méthodologie générale du calcul de ces coefficients s'inspire d'un rapport antérieur (Jaques, mai 1990), le présent rapport renferme un certain nombre de changements. L'étude antérieure comptabilise les émissions dues à la biomasse, c'est-à-dire la combustion des liqueurs noires, le brûlage des rémanents, l'incinération des déchets ligneux ainsi que la combustion du bois de chauffage. Ces sources et d'autres processus tels que la respiration et la fermentation libèrent tous du dioxyde de carbone, mais, *à l'échelle humaine, ces sources de carbone sont renouvelables* et, de ce fait, elles sont *fondamentalement* différentes (si l'on tient compte de l'échelle temporelle) des combustibles fossiles et des carbonates inorganiques. Comme nous ne nous intéressons qu'au flux net du carbone de la biosphère terrestre, ces sources de CO_2 dans la biomasse font l'objet d'un traitement distinct. La section 3, qui porte sur le vivant, repose en grande partie sur les résultats de la modélisation du bilan du carbone dans le secteur forestier canadien (MBC-SFC) (Apps et Kurz, 1991).

---

* D'après le potentiel de réchauffement planétaire calculé sur 100 ans, qui est de 22 pour le CH_4, de 270 pour le N_2O et de 5 000 en moyenne pour les CFC.

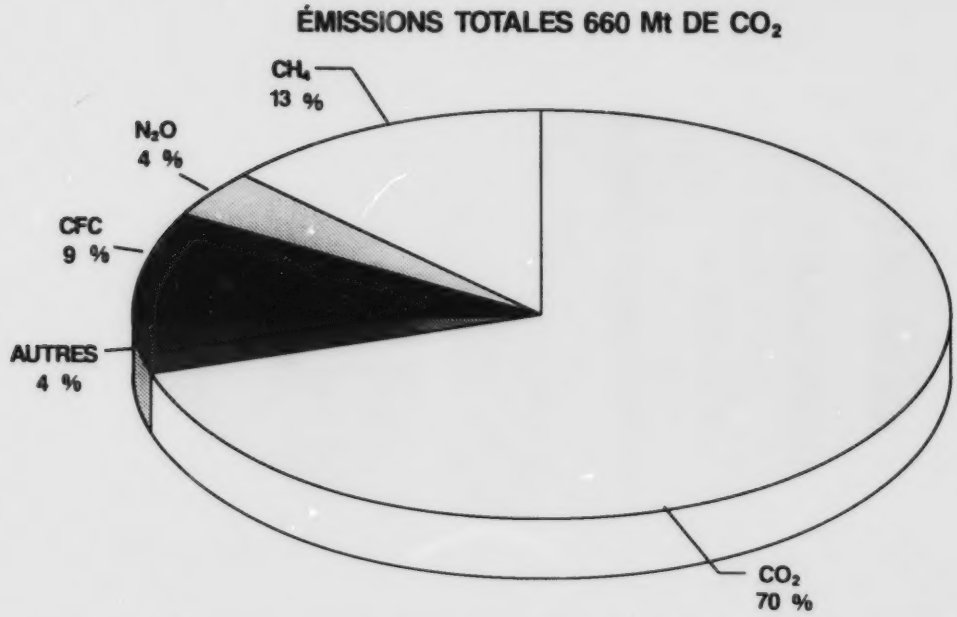


Figure 1 Émissions de gaz à effet de serre au Canada

La production et l'emploi des combustibles fossiles comptent pour près de 97 % de toutes les émissions anthropiques de dioxyde de carbone au Canada. Les 3 % qui restent peuvent être attribués aux industries telles que les cimenteries et les chaufourneries. Pour donner une idée des émissions de CO_2 au Canada, les émissions attribuables aux combustibles fossiles ont été comparées à celles du reste du monde. En 1990, les émissions canadiennes de CO_2 attribuables aux combustibles fossiles, aux cimenteries et aux fours à chaux s'élevaient à environ 461 Mt, c'est-à-dire 125 Mt de carbone. Ce chiffre correspond à environ à 2 % de la quantité planétaire, qui s'élève à 6 000 Mt de carbone (Marland, 1992). Par habitant, toutefois, le Canada se place au troisième rang mondial, principalement à cause de sa faible population et de sa forte consommation d'énergie par habitant. À ce titre, la figure 2 montre les dix pays industrialisés dont les émissions de CO_2 par habitant sont les plus élevées au monde.

1.2 Le méthane

Important en raison de l'effet de serre qu'il exerce, ce gaz limite également l'abondance de l'ozone (O_3) de la troposphère, autre gaz important par son effet de serre, près de la tropopause, et l'abondance du radical hydroxyl (OH), qui détermine la durée de vie atmosphérique des autres gaz importants pour le climat (GIEC, 1992; Dickenson et Cicerone, 1986; Ramanathan, Callis, Cess, Hansen, Asaksen, Kuhn, Lacis, Luther, Mahlman, Reck et Schlesinger, 1987). Il peut également s'oxyder en CO_2.

En 1991, la concentration atmosphérique de CH_4 était de 1,72 ppm, ce qui est plus du double de la concentration préindustrielle, qui était de 0,8 ppm environ (GIEC, 1992). Le gaz s'accumule dans l'atmosphère au rythme d'environ 13 parties par milliard (ppb) en volume par année ou 37 Mt, ce qui est inférieur aux 20 ppb par année observés à la fin des années 1970 (GIEC, 1992; Lassey, Lowe, Manning et Waghorn, 1991).

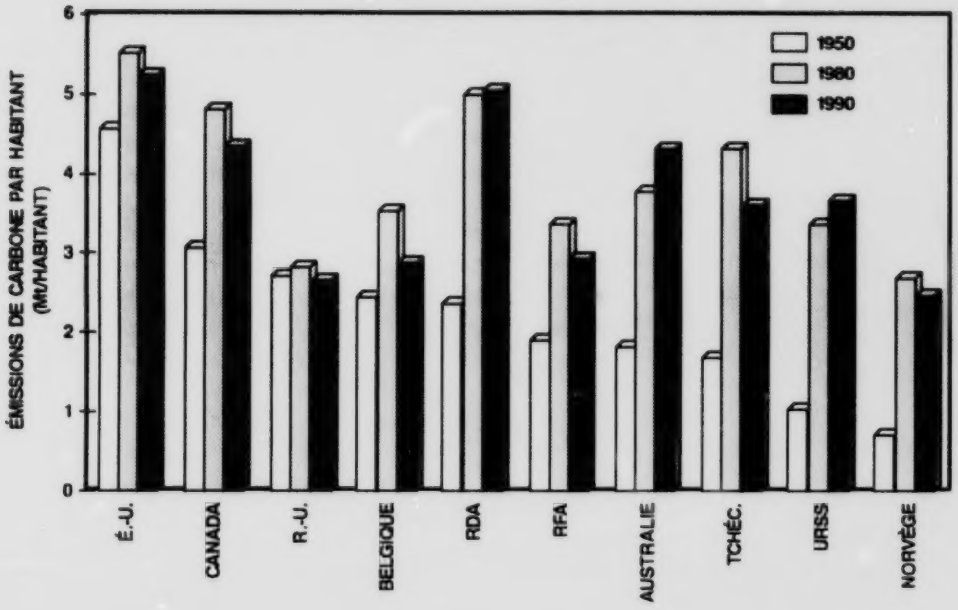


Figure 2 Répartition des émissions de dioxyde de carbone selon les pays

À l'instar du CO_2, le déséquilibre entre les sources et les puits de méthane se traduit par l'augmentation de la concentration atmosphérique. Plusieurs auteurs ont tenté de dresser le bilan du CH_4 en estimant l'importance des principaux puits (Vaghjiani et Ravishankara, 1991; Crutzen, 1991; Fung, John, Lerner, Matthews, Prather, Steele et Fraser, 1991; GIEC, 1992) et des principales sources (Crutzen, 1991; Okken et Kram, 1989; GIEC, 1992) de ce gaz. À l'échelle planétaire, on estime que les principaux facteurs de disparition totalisent 460 ± 95 Mt de CH_4 par année, dont 91 % environ sont attribuables à la réaction du gaz avec le radical OH dans la troposphère. On estime les émissions annuelles à l'échelle de la planète à 500 Mt, d'après l'ampleur des causes de la disparition du gaz et de l'accumulation annuelle de ce dernier dans l'atmosphère. La quantité émise comprend celle des sources anthropiques (environ 360 Mt) et naturelles (140 Mt) (GIEC, 1992).

On estime que les lieux d'enfouissement sont la principale source des émissions de méthane au Canada, à environ 38 % de l'apport des sources anthropiques. Parmi les autres sources importantes, citons les fuites de l'exploitation pétrolière et gazière d'amont (~29 %) et les animaux domestiques (~27 %). Il est donc évident que les efforts visant à réduire les émissions de dioxyde de carbone, c'est-à-dire à accroître l'efficacité de la combustion des combustibles fossiles, ne seront pas aussi efficaces pour réduire les émissions de méthane. La mesure des rapports isotopiques du carbone du méthane atmosphérique a permis à un certain nombre de chercheurs (Whalen, Tanaka, Henry, Deck, Zeglen, Vogel, Southon, Shemesh, Fairbanks et Broecker, 1989; Manning, Lowe, Melhuish, Sparks, Wallace et Brenninkmeijer, 1990; Quay, King, Stutsman, Wilbur, Steele, Fung, Gammon, Brown, Farwell, Grootes et Schmidt, 1991; Lassey, Lowe, Manning et Waghorn, 1991) d'estimer la proportion de méthane imputable au *carbone fossile* à

environ 20 % des émissions annuelles totales de CH_4 à l'échelle de la planète (~100 Tg selon le GIEC, 1992). Parce que les concentrations, les tendances actuelles et les rapports isotopiques de ce gaz atmosphérique découlent de déséquilibres entre les sources et les puits, affectés d'une pondération exponentielle sur une dizaine d'années (la durée moyenne de vie d'une molécule de méthane), il faudrait fonder les estimations des émissions sur plusieurs décennies pour réussir à déterminer la fraction que l'on peut considérer comme les *émissions nettes*. En d'autres termes, comme le méthane n'est pas directement piégé par la biomasse, il est difficile de déterminer la proportion des émissions que l'on devrait considérer comme faisant partie d'un cycle fermé. C'est pourquoi les émissions dues à la biomasse et aux combustibles fossiles sont prises en considération ensemble.

1.3 L'oxyde de diazote

Cet autre gaz trace important absorbe beaucoup dans l'infrarouge et il contribue ainsi à l'effet de serre. Sa molécule a un pouvoir d'absorption environ 200 fois plus grand que celui du dioxyde de carbone.

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM, 1992), les concentrations atmosphériques actuelles de N_2O sont d'environ 310 ppb, ce qui est 8 % de plus qu'avant l'ère industrielle. Le gaz s'accumule dans l'atmosphère au rythme d'environ 0,2 à 0,3 % par année, soit environ 3 à 4,5 Mt d'azote.

Malgré l'incertitude relative des estimations des émissions de N_2O, les sols semblent un facteur prédominant (GIEC, 1992). Les principales causes de la disparition du gaz sont la photodissociation et la photooxydation stratosphériques, dont on estime l'amplitude entre 7 et 13 Tg d'azote (GIEC, 1992). On n'a pas mesuré l'effet dissociant des sols, que l'on pense pouvoir être une cause mineure de destruction. Selon l'ampleur des puits et le rythme d'augmentation annuel de la concentration atmosphérique, la quantité annuelle d'émission, toutes sources confondues, se situerait entre 10 et 17,5 Mt d'azote. Toutefois, les estimations fondées sur l'utilisation des combustibles et carburants, la dénitrification dans les sols et les quantités industrielles n'atteignent qu'entre 5,2 et 16,1 Mt d'azote (GIEC, 1992). Il est donc évident que les sources sont sous-estimées ou qu'il en reste d'autres à découvrir.

Faute de résultats de mesures prises à la source, les estimations actuelles des émissions de N_2O sont considérées comme présentant une forte incertitude. Néanmoins, les émissions anthropiques du gaz au Canada ont été estimées pour 1990. Les carburants, surtout à cause des catalyseurs trifonctionnels, comptent pour environ 52 % du total; viennent ensuite les industries (~36 %) et l'emploi des engrais (~12 %). Les premières estimations des émissions dues aux sols (considérées actuellement comme naturelles) font que cette origine est environ 10 fois plus importante que les sources anthropiques.

1.4 Précision des estimations

Cet inventaire préliminaire des émissions ne s'accompagne d'aucune analyse de l'erreur des estimations. Il en sera question dans des rapports ultérieurs, dès qu'une voie d'approche systématique aura été adoptée pour l'évaluation de toutes les causes d'erreur. Pour le moment, les estimations des émissions de certains gaz ainsi que les estimations des différentes sources sont amplement variables. Les estimations des émissions de CO_2 dues à la combustion sont considérées comme relativement précises. Les erreurs sont modestes, et leurs causes se ramènent principalement à trois hypothèses : (1) la précision des données relatives aux combustibles fossiles; (2) la quantité de carbone dans ces combustibles; (3) le pourcentage d'oxydation du carbone en dioxyde à la faveur de la combustion.

Le méthane et l'oxyde de diazote sont, toutefois, deux gaz dont le coefficient d'émission dépend de nombreux facteurs. Dans le cas des sources de combustion, les émissions dépendent du type de dispositif de combustion, de l'âge de ce dernier, des températures de fonctionnement, des types de combustible, des températures ambiantes, de l'emploi ou non de dispositifs d'épuration et de l'état dans lequel ces derniers se trouvent. Pour ce qui est de la production de méthane due à la fermentation intestinale, le coefficient d'émission dépend des aliments ingérés, de l'animal et de son état de santé. Dans le cas des lieux d'enfouissement, les émissions de CH_4 dépendent d'un certain nombre de facteurs tels que le type de déchet, la quantité de ces derniers, les conditions climatiques ainsi que l'âge de la décharge. À cause du nombre élevé de variables dont on se sert pour arriver à estimer les émissions, la précision des résultats peut jouer d'un coefficient de 10. Pour certaines sources, l'intervalle de l'estimation peut être très étendu, notamment si l'on ne dispose que d'un nombre limité de mesures qui, elles-mêmes, sont très variables.

1.5 Potentiels de réchauffement planétaire

Par définition, le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) est la modification, intégrée dans le temps, de l'absorption du rayonnement, consécutive au dégagement instantané de 1 kg d'un gaz trace, relativement à la modification du même rayonnement consécutive au dégagement de 1 kg de CO_2 (GIEC, 1990). En d'autres termes, le PRP est une mesure relative du potentiel de réchauffement de la troposphère à la surface du globe, du fait de l'émission d'un gaz qui absorbe les rayonnements. Le PRP d'un gaz à effet de serre tient compte de l'absorption instantanée du rayonnement due à l'augmentation différentielle de concentration de même que de la durée de vie du gaz (GIEC, 1990).

La notion de PRP et l'utilisation de ce paramètre comme indice de classement des répercussions relatives et cumulatives des émissions de gaz à effet de serre sont utiles pour les décideurs, mais il faut souligner qu'elle donne lieu à de nombreuses incertitudes. Ces limites sont décrites ailleurs dans le détail (GIEC, 1992; Wang, Dudek, Liang et Kiehl, 1991; OMM, 1992). Comme le PRP est une mesure de l'effet planétaire de l'émission d'un gaz donné à effet de serre, il convient presque parfaitement aux gaz qui subissent un bon brassage dans la tropopause (CO_2, CH_4, N_2O et hydrocarbures halogénés).

De nombreuses autres incertitudes s'ajoutent à la mesure des effets indirects, notamment des gaz tels que l'ozone (O_3), dont la production dépend de la concentration relative de CH_4, des NO_x, de CO et des HCNM. Les PRP directs des gaz bien brassés ont été révisés et viennent d'être publiés (GIEC, 1992); ils sont donnés au tableau 1. Les PRP indirects des NO_x, des HCNM, du CO, des hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et des hydrofluorocarbures (HFC) sont considérés comme trop incertains pour donner lieu actuellement à des estimations, tandis que le PRP indirect qui avait été calculé pour le méthane ne devrait pas être utilisé parce qu'il est également considéré comme inexact. Dans ce cas même, on sait que certains des effets indirects du méthane sont importants, et il est possible que le PRP total du CH_4 (PRP direct plus PRP indirect) sera considérablement plus élevé que la valeur montrée au tableau 1. D'autre part, on sait que les effets indirects de certains autres gaz, même s'ils ne sont pas encore quantifiés, sont négatifs.

Tableau 1 Potentiels directs de réchauffement planétaire des gaz traces

Gaz trace	Durant la vie de la molécule (années)	20 ans	100 ans	Effet indirect
CO_2	-	1	1	nul
CH_4	10,5	34	11	pos.
N_2O	132,0	250	270	incertain
CFC-11	55,0	4 400	3 400	nég.
CFC-12	116,0	7 000	7 100	nég.
CFC-113	110,0	4 400	4 500	nég.
CFC-114	220,0	5 900	7 000	nég.
CFC-115	550,0	5 300	7 000	nég.
HCFC-22	15,8	4 100	1 600	nég.
HCFC-123	1,7	330	90	nég.
HCFC-124	6,9	1 500	440	nég.
HFC-125	40,5	5 100	3 400	nul
HFC-134a	15,6	3 100	1 200	nul
HCFC-141b	10,8	1 800	580	nég.
HCFC-142b	22,4	3 900	1 800	nég.
HFC-143a	64,2	4 600	3 800	nul
HFC-152a	1,8	520	150	nul
CCl_4	47,0	1 800	1 300	nég.
CH_3CCl_3	6,1	360	100	nég.
CF_3Br	77,0	5 600	4 900	nég.
$CHCl_3$	0,7	92	25	nég.
CH_2Cl_2	0,6	54	15	nég.
CO	des mois	-	-	pos.
HCNM	des jours à des mois	-	-	pos.
NO_x	des jours	-	-	incertain

Section 2

Émissions de dioxyde de carbone

Les méthodes qui ont été utilisées pour estimer les émissions de CO_2 au Canada se fondent sur les travaux de Marland et Rotty (Marland et Rotty, 1983) et ce sont essentiellement celles sur lesquelles repose un rapport antérieur sur la question (Jaques, mai 1990). Les émissions ont été estimées à partir de coefficients élaborés en fonction du type de combustible fossile utilisé au Canada. Certains des coefficients du rapport de 1990 ont été modifiés de façon à mieux correspondre aux écarts régionaux, tandis que quelques sources sont venues s'ajouter à celles du premier inventaire. Un résumé des émissions, selon la source, est donné au tableau 2.

Les principales modifications concernent l'inclusion de certains produits de pétrole raffiné, absents des premières estimations; la prise en considération du CO_2 séparé du gaz naturel; la modification du coefficient d'émission rattaché à l'huile lourde, qui passe de 71,54 à 74 t/TJ; l'augmentation des émissions attribuables aux incendies de forêt; la baisse des émissions dues au brûlage dirigé; la prise en considération d'emplois non énergétiques (huiles de graissage, naphtas, matières premières de la pétrochimie); ainsi que la révision des coefficients d'émission rattachés au charbon, qui varient d'une province à l'autre.

Notion assez simple, le fondement du calcul des coefficients d'émission du CO_2 est exposé dans la section 7. Les méthodes d'estimation des émissions se fondent sur la teneur en carbone des combustibles et carburants, sur la fraction du carbone oxydé et sur la quantité de carburants ou de combustibles utilisés. Elles correspondent aux méthodes adoptées à l'échelle internationale (OCDE, 1991). À noter que les hydrocarbures et les particules formés durant la combustion sont pris en considération à un certain degré, mais que les émissions de monoxyde de carbone (CO) sont intégrées aux émissions estimatives de CO_2. Le problème de double comptage qui peut en découler, lorsque l'on veut dresser le bilan du carbone, est cependant mineur. En outre, dans l'atmosphère, le monoxyde subit une oxydation complète en dioxyde, en moins de 5 à 20 semaines après l'émission (GIEC, 1990).

Afin de faciliter la comparaison des sources ainsi que des puits de carbone et de brosser un tableau plus clair des principaux gaz émis, le tableau 3 présente les émissions sous forme de C, de CO_2, de CO et de CH_4. Si l'on cite le tableau 3, la prudence est de mise, puisque les émissions des divers gaz ont été estimées à l'aide de méthodes différentes, dont la précision varie selon une large gamme. À noter également que, pour prévenir le double comptage, les estimations des émissions de CO_2 ont été modifiées pour tenir compte de la fraction du carbone qui, au départ, forme du CO et du CH_4.

2.1 Procédés industriels

2.1.1 Cimenteries

Les cimenteries dégagent des quantités considérables de CO_2. Les deux méthodes de fabrication utilisées au Canada, la voie humide et la voie sèche, dégagent du CO_2 durant la réduction du carbonate de calcium. En principe, les émissions de CO_2 sont directement proportionnelles à la teneur en chaux (*cf.* subdivision 2.1.2). En 1990, la production de ciment, déclarée d'après la quantité des livraisons des usines, a totalisé 11 252 043 t (EMR, 1991a). Compte tenu d'un coefficient d'émission de 0,50 t de CO_2 par tonne de ciment produite (la méthode de

Tableau 2 Émissions de dioxyde de carbone selon la source

	CO_2 (Mt)	(Pourcentage du total)
Gaz naturel[a]	140	30,37
Charbon	83	18,00
Essence à moteur	80	17,35
Gazole	47	10,20
Huile lourde	33	7,16
Huile légère	18	3,90
Essence d'aviation	13	2,82
Coke et gaz de cokerie	12	2,60
Gaz distillé	8	1,74
Kérosène	2	0,43
Gaz de pétrole liquéfiés	7	1,52
Matières premières de la pétrochimie	2	0,43
Huiles de graissage	1	0,22
Autres produits	1	0,22
Coke de pétrole	6	1,30
Cimenteries et fours à chaux	8	1,74
Bois de chauffage	25[b]	-
Brûlage dirigé	9[b]	-
Incinération	9[b]	-
Liqueurs noires	28[b]	-
Lieux d'enfouissement	4[b]	-
Émissions totales	**461**	**100,00**

[a] Y compris le CO_2 retiré du gaz naturel.
[b] Les totaux ne tiennent pas compte des sources de la biomasse.

calcul est expliquée dans la section 7), les émissions de CO_2 ont été estimées à 5,61 Mt. Les émissions dans les provinces ont été estimées à partir de la capacité de production de chacune relativement à la production nationale totale.

2.1.2 Fours à chaux

La calcination des calcaires pour les décarbonater donne de la chaux vive. L'opération est pratiquée à des températures élevées, dans un four rotatif, et elle dégage du CO_2. La chaux vive est principalement utilisée dans les aciéries où elle sert de fondant. L'industrie des pâtes et papiers s'en sert pour la préparation des liqueurs blanches et, en petite quantité, pour le traitement des effluents. En 1990, 2,4 Mt de chaux vive ont été produites au Canada (EMR, 1991b). À partir d'un coefficient de 0,79 t de CO_2 par tonne de chaux vive produite, on estime à 1,9 Mt les émissions de CO_2 provenant des fours à chaux du Canada.

2.1.3 Fabrication de l'ammoniac

Au Canada, l'ammoniac est surtout fabriqué par le procédé Haber-Bosh : un mélange gazeux d'azote et d'hydrogène, dans un rapport de 1 à 3, est mis à réagir à température et à pression élevées, en présence d'un catalyseur. L'azote peut être tiré de l'air par liquéfaction de ce dernier, par réaction du

Tableau 3 Sources et puits de carbone au Canada (quantités annuelles)

Sources et puits[a]	Émissions (Mt) de			
	C	CO_2	CO	CH_4
Sources anthropiques directes				
a) Utilisations énergétiques				
Combustibles fossiles	121,5	431,05	8,57	0,36
Combustibles végétaux (biomasse)	15,0	54,00	0,62	0,00
Total partiel	**136,5**	**485,05**	**9,19**	**0,36**
b) Utilisations non énergétiques				
CO_2 brut	2,1	7,70	-	-
Incinération	0,4	1,40	0,04	0,00
Cimenteries et fours à chaux	2,1	7,56	-	-
Biomasse	4,6	14,60	1,29	0,04
Lieux d'enfouissement	2,1	3,87	-	1,41
Fumiers	0,2	-	-	0,33
Animaux domestiques	9,9	34,60	-	0,67
Fuites de gaz naturel	0,2	-	-	0,29
Mines de charbon	0,1	-	-	0,14
Agriculture	?			
Total partiel	**21,7**	**69,73**	**1,33**	**2,88**
Total	**158,2**	**554,78**	**10,52**	**3,24**
Sources anthropiques indirectes et sources naturelles				
Incendies de forêt et de prairie	31,4	98,82	9,88	0,33
Décomposition des produits ligneux	23,1	84,70	-	-
Insectes	0,1	0,37	-	-
Terres humides	18,0	-	-	24,00
Animaux sauvages	0,1	-	-	0,15
Total partiel	**72,7**	**183,89**	**9,88**	**24,49**
Total général (toutes les sources)	**230,9**	**738,67**	**20,40**	**27,73**
Puits				
Océans	?			
Agriculture	?			
Biomasse forestière	92,0			
Sols	17,0			
Tourbières	26,0			
Total général (puits)	**135,0**			

[a] Bilan net du carbone (sources - puits) = 96 Mt de carbone

gaz de gazogène ou par combustion de l'oxygène de l'air avec de l'hydrogène. Les sources de l'hydrogène sont nombreuses : gaz à l'eau, gaz de cokerie, gaz naturel, pétrole, gaz de réformage catalytique et électrolyse de l'eau ou de la saumure (Industrial Chemicals, 1980). Un coefficient d'émission a été calculé pour l'ammoniac obtenu du gaz naturel dont tout le carbone est transformé en CO_2, puis dégagé dans l'atmosphère. Toutefois, une grande partie du carbone, qui sert à la fabrication de l'ammoniac, est combinée sous forme d'urée, ce qui réduit d'autant les émissions de CO_2 attribuables au procédé.

Selon l'Institut canadien des engrais (Institut canadien des engrais, 1992), la production canadienne d'ammoniac et d'urée, en 1990, se chiffre à 3 709 943 et à 2 576 670 t, respectivement. Sur ces 3,7 Mt d'ammoniac, environ 0,5 Mt a été produite à l'aide d'hydrogène qui était le sous-produit d'un autre procédé. D'après un coefficient d'émission de 1,56 t de CO_2 par tonne d'ammoniac produit à partir du gaz naturel (*cf.* section 7) et d'après la proportion de CO_2 dans l'urée (0,73 t de CO_2 par tonne d'urée), les émissions de CO_2 accompagnant la fabrication de l'ammoniac ont été estimées à 3,2 Mt. Ces émissions découlent d'une utilisation non énergétique, et c'est dans cette catégorie qu'elles sont classées dans le tableau S.2. Au Canada, 92 % de l'ammoniac sert en agriculture à maintenir la fertilité du sol et à faire croître les cultures (Environnement Canada, 1987). Contrairement à certains produits des utilisations non énergétiques des combustibles fossiles, l'ammoniac peut enrichir les sols en carbone organique et ainsi aider à immobiliser le CO_2. Une étude effectuée en Saskatchewan, sur une période de 30 années, (Campbell, Biederbeck, Fentnor et Lafond, 1991) montre que la teneur en carbone de l'horizon superficiel du sol est passée de 36,3 t par hectare dans une rotation blé-jachère à 41,9 t par hectare dans une culture continue du blé avec fumure. Il est donc évident, si l'on veut bien évaluer le rôle de l'agriculture sur les changements climatiques et, en particulier, sa contribution aux émissions, qu'il faut quantifier à la fois les sources et les puits des gaz incriminés. Dans la section 3, on discutera plus en détail du rôle de l'agriculture comme moyen d'immobiliser le carbone.

2.1.4 Utilisations non énergétiques

Un certain nombre de produits pétroliers sont considérés comme l'aboutissement d'utilisations non énergétiques ou comme des sous-produits de la combustion, qui immobilisent le carbone et qui, par conséquent, ne devraient pas être considérés comme des sources d'émission du CO_2. Ce sont, entre autres, les plastiques, le caoutchouc, l'asphalte, le bitume et le formaldéhyde (Okken et Kram, 1990). Les sources non énergétiques qui libèrent le carbone relativement vite comprennent la fabrication de l'ammoniac, les naphtas, les huiles de graissage; l'emploi, comme matières premières, des gaz de pétrole liquéfiés et du gaz naturel; le coke et les charbons. Pour ces produits, l'estimation des émissions de CO_2 repose sur les hypothèses suivantes concernant le pourcentage de carbone non séquestré dans le produit. Dans le cas des matières premières de la pétrochimie, des gaz de pétrole liquéfiés et des naphtas, il s'élevait à 20 %, dans celui des huiles de graissage, à 50 %, dans les emplois non énergétiques du gaz naturel, à 67 % (OCDE, 1991). On a estimé à 100% les émissions de carbone dans le cas des charbons, du coke et des gaz de cokerie utilisés à des fins non énergétiques. Les émissions totales de CO_2 découlant de l'emploi non énergétique de ces substances ont été estimées à 13,6 Mt en 1990.

2.1.5 Dioxyde de carbone extrait du gaz naturel

Une autre source de CO_2, qui ne provient pas de la combustion, est le traitement du gaz naturel brut. Le plus souvent, ce dernier est *acide*, c'est-à-dire constitué d'un mélange de plusieurs hydrocarbures (CH_4 surtout), de

sulfure d'hydrogène (H_2S), d'eau (H_2O) et de CO_2, en proportions variables, selon le gisement. Le traitement consiste à éliminer presque tous les constituants précités, sauf le méthane, ce qui donne le gaz vendu au consommateur. Après extraction des hydrocarbures lourds, le gaz résultant est mis à réagir avec une amine, qui élimine le CO_2 et le H_2S. Le gaz naturel peut renfermer jusqu'à 26 % de CO_2 (Falls, 1991) à la tête du puits, même si, la plupart du temps, la teneur en ce gaz est beaucoup plus faible. À partir des dosages du CO_2 présent dans les gaz non traités, qui ont été effectués par *Energy Resources Conservation Board* (ministère de l'Énergie de l'Alberta, 1990) et Westcoast Energy (Falls, 1991), et à partir des émissions de CO_2 accompagnant le dégazage (7 % environ en moyenne), on estime à 7,6 Mt la quantité de CO_2 extrait du gaz naturel au stade de la préproduction, en 1990.

2.2 *Foyers fixes de combustion*

2.2.1 *Centrales électriques*

En 1990, la production d'électricité au Canada a baissé à 465 967 GW · h, poursuivant le mouvement amorcé en 1989 (EMR, 1991b). L'électricité provenant de centrales alimentées par des combustibles fossiles a constitué 22 % du total, soit 103 983 GW · h. De ce total, la part des centrales au charbon, au pétrole, au gaz naturel et aux autres combustibles est respectivement de 75, de 14, de 9, et de 2 % environ. Sur l'ensemble, les parts respectives de l'hydroélectricité et du nucléaire sont de 63 et de 15 % environ. La part des usines marémotrices est très petite, 26 MW · h (EMR, 1991). Le nucléaire et l'hydroélectricité ne sont pas considérés comme émettant directement du CO_2. On pense toutefois qu'il se dégage du méthane et du CO_2 des retenues des barrages hydroélectriques. C'est une hypothèse que l'on cherche à vérifier (Pêches et Océans, 1992). On emploie deux méthodes fondamentales pour la production d'électricité à partir des combustibles fossiles : la production de vapeur et la combustion interne (turbines à gaz et moteurs alternatifs). Les chaudières à turbines à vapeur sont alimentées en charbon, en mazout lourd, en huile brute ou en gaz naturel (la vapeur peut d'abord être obtenue à l'aide du mazout léger, du gaz naturel, du kérosène ou du gazole), tandis que les moteurs alternatifs brûlent de l'huile légère, du gaz naturel, une combinaison des deux ou du gazole.

Les estimations des émissions de CO_2 se fondent sur la consommation de combustibles fossiles dans les centrales d'électricité (services publics et industrie), sur la nature du combustible, son contenu énergétique, sa teneur en carbone et la fraction de carbone oxydé. Ces méthodes sont décrites dans le détail dans la section 7, et les coefficients d'émission obtenus sont donnés au tableau S.3. D'après ces coefficients et la consommation de combustibles (42 155 kt de charbon; 3 459 900 m^3 d'huile lourde; 33 300 m^3 d'huile légère; $2{,}2 \times 10^9$ m^3 de gaz naturel et 279 000 m^3 de gazole (Statistique Canada, 1991a)), on a estimé à 93,9 Mt de CO_2 les émissions des centrales électriques à combustible fossile, soit environ 20 % de toutes les émissions anthropiques de ce gaz en 1990.

2.2.2 *Foyers de combustion*

Foyers industriels. La consommation de combustible dans l'industrie, en 1990, est donnée au tableau 4 (Statistique Canada, 1991a). Ce secteur englobe les mines, les pâtes et papiers, la sidérurgie, les fonderies et affineries et l'industrie chimique. D'après les coefficients d'émission calculés pour chaque type de combustible (*cf.* section 7), on a estimé les émissions de CO_2 à 75,4 Mt en 1990.

Foyers commerciaux. L'utilisation des combustibles dans ce secteur est donnée au tableau 4. Les émissions ont été calculées selon le type de combustible, à l'aide des coefficients calculés dans la section 7 et donnés au tableau S.2. Elles ont été estimées à 24 Mt en 1990.

Tableau 4 Consommation de combustible dans les sources fixes (1990)

Catégories de foyers fixes	Charbon (kt)	Gaz naturel (GL)	Huile lourde (ML)	Kérosène et mazout léger nº 1 (ML)	Propane (ML)	Huile légère (ML)
Industriels	1 641	36 655	3 894	50	934	301
Commerciaux	-	9 763	158	112	833	1 219
Résidentiels	109	13 987	37	437	489	4 328
Autres	7	4 707	111	90	279	278

Foyers résidentiels. Selon les quantités du tableau 4, on a estimé les émissions de CO_2 à 40,7 Mt. À l'instar des autres secteurs, les combustibles utilisés ne comprennent pas les carburants qui servent au transport.

Autres combustibles. Cette catégorie exclut les carburants, mais elle comprend les combustibles qui, d'après Statistique Canada, servent en agriculture, dans les administrations publiques, dans les compresseurs des gazoducs ainsi que dans la fabrication de produits de l'énergie primaire et de l'énergie secondaire. Ces combustibles sont énumérés au tableau 4. On a estimé les émissions de cette catégorie à 52,7 Mt en 1990 et les émissions totales de tous les foyers fixes à 286,6 Mt.

2.3 Carburants (moyens de transport)

Les émissions de CO_2 provenant de la combustion des combustibles fossiles sont traitées dans la présente section. La figure 3 donne l'apport relatif de chaque moyen de transport aux émissions de CO_2.

2.3.1 Véhicules routiers à essence

Les émissions de tous ces véhicules à essence conduits sur la voirie publique, y compris les automobiles, les camions, les autobus et les autocars ainsi que les motocyclettes, entrent dans cette catégorie.

Le coefficient qui a servi à estimer les émissions de tous ces véhicules est de 67,98 t de CO_2/TJ (*cf.* sous-section 7.2). Tout à fait simple, le calcul de ce coefficient repose sur l'hypothèse qu'un certain taux du carbone entrant dans la composition du carburant finit par être émis et qu'il forme du CO_2. Idéalement, le taux de ce carbone dégagé sous forme de CO devrait se situer entre 0,6 et 1,2 % du carbone dégagé sous forme de CO_2 (Environnement Canada, 1989). En réalité, ce pourcentage est supérieur, mais on a posé comme hypothèse que ce CO se transformait finalement en CO_2. Cette conclusion s'accorde avec la méthode adoptée par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) (OCDE, 1991).

Du méthane et d'autres matières organiques sont libérés en quantités beaucoup plus petites que le CO_2. Le fait d'en tenir compte ou non influe moins sur les estimations que les erreurs inhérentes qui entachent les coefficients d'émission. Dans la section 7, les hypothèses seront l'objet d'une discussion plus détaillée. La ventilation des émissions selon le type de véhicule pose beaucoup plus de difficultés.

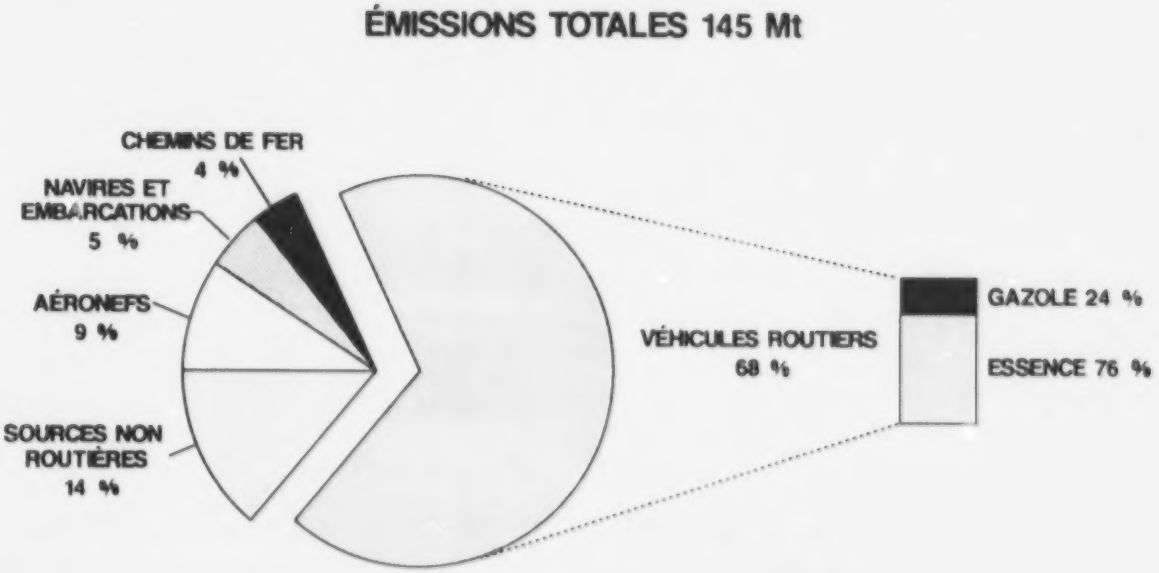


Figure 3 **Répartition des émissions de dioxyde de carbone entre les divers moyens de transport**

Le *MOBILE4.1C* est un modèle informatique qui permet d'estimer les émissions des différents types de véhicules. Cette version canadienne du modèle *MOBILE4* de l'*Environmental Protection Agency* (EPA) des États-Unis intègre les résultats du contrôle des gaz d'échappement de plus de 10 000 véhicules américains, effectué au cours des 20 dernières années, et elle permet de calculer des coefficients d'émission pour différents types de véhicules et différentes techniques antipollution. En tenant compte de la vitesse normale d'usure des véhicules et en posant par hypothèse la vitesse moyenne de circulation, la température ambiante, l'amplitude thermique diurne, l'altitude, la volatilité du carburant et la pénétration (rythme d'adoption) des techniques, on a calculé des coefficients d'émission qui donnent une idée fidèle du parc automobile au Canada. Le modèle permet le calcul des coefficients d'émission des NO_x, des hydrocarbures (HC), du CO ainsi que des composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), mais il n'estime pas les émissions de CO_2 ni de N_2O. L'estimation des gaz à effet de serre a donc suivi un cheminement différent. Le modèle *MOBILE4* définit comme suit les diverses catégories de véhicules :

Voitures particulières (automobiles). Tout véhicule d'une masse brute nominale inférieure à 3 855 kg, conçu pour transporter au plus 12 passagers et ne possédant pas de caractéristiques spéciales telles que quatre roues motrices, ce qui en ferait un véhicule tout-terrain.

Utilitaires légers à essence. Véhicules d'une masse brute nominale inférieure à 3 855 kg, conçus surtout pour le transport de marchandises ou moins de 12 passagers ou possédant des caractéristiques de véhicules tout-terrain. Cette catégorie comprend la plupart des camionnettes, fourgonnettes, minibus et

minicars, les véhicules à quatre roues motrices et les dérivés de ces véhicules.

Utilitaires lourds à essence. Véhicules d'une masse brute nominale de plus de 3 855 kg. Cette catégorie comprend les grosses camionnettes, les semi-remorques ainsi que les camions poids lourd, d'une masse nominale brute d'au moins 8 t.

Selon les statistiques de la consommation de carburant (Statistique Canada, 1991a), les émissions ont été ventilées entre la consommation routière de l'essence (93 % de la consommation) et les autres emplois de ce carburant. La première catégorie est constituée du transport routier, des ventes d'essence à la pompe, des emplois commerciaux, des véhicules de l'État et d'un pourcentage de la consommation d'essence signalée dans le secteur agricole. La consommation non routière comprend celle des motoneiges, des tondeuses, des embarcations hors-bord et en-bord, des engins d'exploitation forestière, du matériel agricole et du matériel de construction. Afin de mieux ventiler les émissions à l'intérieur de ces catégories, plus précisément la consommation routière, j'ai posé certaines hypothèses sur le kilométrage et les types de véhicules. Les estimations nationales de 1987 (Jaques, mai 1990) se fiaient exclusivement au modèle informatique *Escon*, de Du Pont, pour déterminer l'efficience énergétique des différents parcs; elles se fiaient également à des estimations antérieures d'Environnement Canada sur le kilométrage moyen de même que sur des données fournies par Statistique Canada (Statistique Canada, 1988) sur l'immatriculation des véhicules. Certains coefficients ont été révisés à la lumière de données plus récentes.

Pendant onze ans, de 1979 à 1988, Statistique Canada et Transports Canada ont effectué une enquête sur la consommation de carburant par les voitures particulières, les camionnettes et les camions-remorques. Malheureusement, parce que certains types de véhicules tels que les voitures de location, les taxis, les véhicules faisant partie d'un parc, les autos-écoles et les voitures anciennes avaient été omis, l'ensemble visé en 1988, que l'on estimait à 8,2 millions de véhicules (Statistique Canada, 1990; Lawrence, 1991) ne représentait que 68 % des 11,9 millions d'unités immatriculées au Canada cette année-là. Il a donc fallu poser que les chiffres de la consommation de carburant obtenus par ces enquêtes s'appliquaient à l'ensemble du parc automobile. Pour estimer la consommation de chaque type de véhicules omis par les enquêtes, il a fallu puiser dans d'autres sources d'information.

Les chiffres sur le parc automobile ont été estimés à partir de données déduites des ventes de véhicules neufs et du rythme d'usure (Office national de l'énergie, 1991a, b). Le kilométrage selon le type de véhicule est fondé sur les moyennes pondérées des estimations provinciales (Terrillon, 1991). Enfin, les chiffres sur l'économie de carburant se fondent sur les moyennes pondérées de la consommation en fonction du perfectionnement technique (Statistique Canada, 1991a; OCDE, 1991; Terrillon, 1991; Lavallee et Terrillon, 1991).

Afin de déterminer la fidélité des coefficients relativement au parc automobile réel, on a effectué une comparaison indirecte en estimant la consommation de carburant en 1990. Le tableau 5 résume les chiffres qui ont servi aux calculs. La consommation totale d'essence à moteur sur la route a été estimée à 31,49 GL, tandis que la consommation totale d'essence en 1990 a été chiffrée à 33,94 GL (Statistique Canada, 1991a). L'écart, 2,45 GL, concorde de près avec les estimations de la consommation non routière d'essence et confirme jusqu'à un certain point que la ventilation des véhicules est plausible.

Tableau 5 Consommation d'essence et de gazole par les véhicules automobiles (1990)

Véhicules	Nombre (millions)	Distance parcourue (km)	Consommation de carburant (km/L)	Consommation (GL)	% du total
Moteur à essence					
Automobiles	12,00	16 288	9,4	20,72	65,80
Utilitaires légers	3,60	16 440	6,1	9,77	31,03
Utilitaires lourds	0,14	13 244	2,0	0,93	2,95
Motocyclettes	0,36	2 860	14,1	0,07	0,22
Moteur diesel					
Utilitaires légers	0,02	16 440	5,6	0,05	0,63
Utilitaires lourds	0,25	82 869	2,5	8,32	99,37

À partir des calculs qui précèdent, la ventilation du taux de consommation de l'essence donne les résultats suivants : automobiles, 65,80 %; utilitaires légers, 31,03 %; utilitaires lourds, 2,95 % et motocyclettes, 0,22 %. Cette ventilation a ensuite été appliquée à la consommation routière d'essence en 1990. Les émissions totales de CO_2 imputables aux véhicules à essence et circulant sur les routes en 1990 ont été estimées à 75 Mt.

Afin de parfaire l'estimation, il faudrait effectuer l'analyse décrite ci-dessus dans chaque province. Le total national des émissions ne changera pas, mais la ventilation entre les types de véhicules différera. Il est même plus important que cette opération soit effectuée pour le calcul des autres émissions telles que le CH_4, le N_2O et les polluants ordinaires, les NO_x, le carbone organique volatil, les matières particulaires totales et le CO, pour lesquels les émissions peuvent varier selon la technique de combustion.

2.3.2 Véhicules routiers à moteur diesel

Les émissions de CO_2 de tous les véhicules à moteur diesel qui circulent sur la voie publique, y compris les automobiles, les camions, les autocars et les autobus, ont été estimées au moyen d'une méthode semblable à celle qui a servi à l'estimation des émissions des véhicules routiers à essence. Selon les ventilations obtenues (tableau 5), les utilitaires légers à moteur diesel, que l'on définit comme possédant une masse brute inférieure à 3 855 kg et un moteur diesel, de même que les utilitaires lourds à moteur diesel, dont la masse brute dépasse 3 855 kg (la plupart possédant une masse de 10 à 40 t), comptaient pour 0,63 et 99,37 %, respectivement, des 22 Mt de CO_2 attribuables aux véhicules routiers à moteur diesel et émises en 1990.

2.3.3 Consommation non routière de l'essence

On la définit comme la consommation de l'essence hors de la chaussée, par le matériel de construction, les engins agricoles, les engins d'exploitation forestière et le matériel général. Environ 7 % de l'essence vendue au Canada en 1990 (2,4 GL) a été ainsi consommée. Les émissions de CO_2 ont été estimées à partir du coefficient général d'émission calculé pour l'essence (67,9 t/TJ). Elles se chiffreraient à 5,6 Mt de CO_2.

2.3.4 *Aéronefs*

Nous considérons deux types principaux d'aéronefs : les aéronefs à moteurs à pistons et les aéronefs à turbines à gaz. Ces deux types se subdivisent ensuite en fonction de la taille de l'appareil et en fonction du moteur le plus utilisé de la catégorie. Les types d'aéronefs retenus sont les avions à réaction, les avions à turbopropulseur, les avions à moteur(s) à pistons et les hélicoptères.

Les émissions de CO_2 ont été estimées uniquement à partir des chiffres cités par Statistique Canada (Statistique Canada, 1991a) sur la consommation d'essence et à partir des coefficients d'émission calculés dans la section 7. La consommation de carburant ne tient compte que des achats effectués au Canada, c'est-à-dire par les sociétés aériennes canadiennes et étrangères. Même si une fraction importante du carburant peut être consommée à l'extérieur de l'espace aérien du Canada par des sociétés aériennes du pays, il n'y a pas eu d'essai de ventilation des émissions en ce sens ni de prise en considération des émissions attribuables aux aéronefs qui survolent l'espace aérien du Canada, mais qui ont acheté leur carburant à l'étranger. D'après les coefficients d'émission de 69,4 et de 70,8 t/TJ ainsi que d'après une consommation de 164 et de 5 000 ML d'essence d'aviation et de carburéacteur, respectivement, les émissions de CO_2 ont été estimées à 13,1 Mt en 1990.

2.3.5 *Transport ferroviaire*

Les émissions du secteur se fondent sur la consommation de carburant pour la production de l'énergie servant à la locomotion. D'après la consommation signalée de gazole par les sociétés ferroviaires (Statistique Canada, 1991a) et d'après un coefficient de 70,69 t/TJ ou de 2,79 t/kL, on a estimé que les émissions de CO_2 imputables au transport par chemin de fer s'élevaient à 6,3 Mt, soit 1,4 % du total des émissions.

2.3.6 *Transport sur l'eau*

Dans le présent paragraphe, il n'est question que des navires qui brûlent du gazole ou du mazout lourd. Les statistiques sur la consommation d'essence par les navires et les embarcations n'ont pas pu être tirées des chiffres des ventes au détail. Les émissions de ces sources sont donc comprises dans celles qui sont imputables à la consommation non routière de l'essence. D'après les coefficients d'émission de 70,69 et de 74,00 t/TJ pour le gazole et le mazout lourd, respectivement, les émissions estimatives de CO_2 en 1990 se chiffrent à 8 Mt.

2.3.7 *Autres véhicules à moteur diesel*

Les émissions de CO_2 dues aux moteurs diesel employés dans les mines, les usines, les chantiers d'exploitation forestière, les chantiers de construction, les administrations publiques et l'agriculture ont été estimées à partir d'un coefficient d'émission de 70,69 t/TJ, appliqué à la consommation signalée de gazole dans ces secteurs d'activité (Statistique Canada, 1991a). En 1990, les émissions de CO_2 attribuables à ces moteurs diesel totalisaient environ 36 Mt.

2.3.8 *Autres carburants*

Dans cette catégorie, les émissions de CO_2 imputables au gaz naturel et au propane ont été estimées à partir des statistiques sur la consommation d'énergie par les moyens de transport (Statistique Canada, 1991a) ainsi que de coefficients d'émission de 49,68 et de 59,84 t/TJ, respectivement. La ventilation de ces émissions entre les différents types de véhicules n'a pas pu être faite, faute de données suffisantes. Les émissions totales de CO_2 de ces sources ont été estimées, en 1990, à 1,7 Mt.

2.3.9 *Sources diverses*

Les autres sources d'émission du CO_2 comprennent notamment la glace sèche, le CO_2 comprimé, les extincteurs et les boissons gazeuses. Même si ces sources ne sont pas quantifiées séparément dans le présent rapport, elles ont été retenues dans l'estimation des émissions totales. Dans la plupart des cas, ces sources achètent le CO_2 d'entreprises industrielles, par exemple, le CO_2 obtenu comme sous-produit de la

fabrication de l'ammoniac, ce qui fait qu'il en est tenu compte dans le bilan des procédés industriels ainsi que dans les utilisations non énergétiques des combustibles.

2.4 *Recommandations de travaux ultérieurs*

La précision des estimations nationales des émissions de CO_2, calculées à partir des chiffres provinciaux établis pour le secteur énergétique est très peu perfectible par la ventilation plus poussée des émissions. Comme les estimations se fondent sur la consommation d'énergie et sur la consommation de chaque combustible et carburant, les seules améliorations à attendre de l'inventaire actuel des émissions de CO_2 proviendraient d'une ventilation plus détaillée des catégories actuellement publiées par Statistique Canada. Statistique Canada (Smith, 1991) a accès à des statistiques beaucoup plus ventilées, qui pourraient donner une idée plus claire des émissions totales d'une industrie particulière. Le niveau de détail actuel recouvre 63 industries, lesquelles sont réunies en 28 catégories de demande finale. Au niveau le plus faible d'agrégation, toutefois, on exploite des données sur 216 industries et 132 catégories de demande finale (Smith, 1991).

Si on pouvait examiner les émissions canadiennes plus en détail, les programmes de conservation pourraient être mieux ciblés, de la façon la plus efficace quant aux coûts. Il est donc recommandé que l'État et l'industrie continuent de collaborer pour que les données nécessaires à l'estimation des émissions dans tout le cycle des combustibles puissent être divulguées dans le cadre d'inventaires nationaux et provinciaux. En outre, les estimations relatives au CH_4 et au N_2O peuvent être améliorées. Dans un premier temps, la priorité devrait aller à l'élargissement du corpus de données des émissions mesurées.

Section 3

Sources et puits de dioxyde de carbone dans la biomasse

Il fait peu de doute que le CO_2 émis par la biomasse, tant du fait de l'être humain (brûlage dirigé, combustion et décomposition du bois et des produits du bois, lieux d'enfouissement, respiration chez l'être humain et les animaux, fermentation) que de la nature (incendies de forêt, de savane et de brousse ainsi que décomposition) finit par se retrouver dans l'atmosphère. De fait, la biomasse contribue ainsi à 7 % des besoins énergétiques totaux du Canada (Boyle, 1992).

Toutefois, il est extrêmement important de souligner cette différence fondamentale entre la biomasse et les combustibles et carburants fossiles. La biomasse constitue en partie un puits pour le CO_2, ce qui n'est pas le cas pour les combustibles fossiles (du moins à l'échelle chronologique humaine), et l'importance de ce puits est *directement corrélée à l'importance de la source*, dans l'hypothèse que son existence est durable. En outre, la biomasse donne lieu à des émissions qui, dans une grande mesure, surviendraient même en l'absence d'intervention humaine : l'influence de l'être humain se fait largement sentir sur le moment où surviennent les émissions (Apps, 1990; Taylor, 1990; Apps et Kurz, 1991). Le fait d'inclure dans les bilans la valeur absolue des émissions estimatives qui découlent de la biomasse est cause d'erreur. Ce qui est plus juste, c'est de séparer les sources et les puits de la biomasse et les sources constituées des combustibles fossiles, puis d'examiner les modifications provoquées par l'être humain sur ces sources et puits. Au présent rapport sont intégrés les résultats d'une première tentative de bilan modélisé du carbone pour le secteur forestier canadien (Apps et Kurz, 1991). Les renseignements sur les flux nets de carbone dus aux pratiques agricoles et l'information sur les autres flux d'origine anthropique sont très lacunaires.

On ne dispose pas d'estimations des pertes de carbone, surtout sous forme de CO_2, par les sols agricoles (Benzing-Purdie, 1992). Ce que l'on sait, c'est que la mise en exploitation agricole des terres peut s'accompagner de pertes considérables et que la plupart des sols actuellement cultivés au Canada ont perdu la moitié de leur contenu d'origine en carbone. Il est très probable que le gros des pertes survient dans les premières années qui suivent la mise en culture et que, maintenant, les sols se trouvent dans un état d'équilibre (Agriculture Canada, 1990). Les résultats d'études à long terme effectuées à Lethbridge (Alberta) prouvent l'effet positif des fumures sur les réserves de matière organique (Janzen, 1986 et 1992). Les résultats de l'analyse du sol, en 1990, portent à croire que l'emploi de fumures azotées, depuis 1967, a augmenté d'environ 3 t par hectare la teneur en carbone organique dans la couche superficielle du sol, dans un système ininterrompu de culture du blé. Les émissions de CO_2 durant la fabrication de l'engrais azoté ont totalisé environ 0,5 t par hectare, et cet engrais a permis la séquestration nette de carbone dans le sol. À noter cependant que dans l'assolement blé-jachère (où la réaction à l'azote est beaucoup plus atténuée), la contribution des engrais à la matière organique peut être minime, ce qui fait que l'emploi des fertilisants selon ces pratiques boiteuses peut se traduire par une augmentation nette des émissions de CO_2 (Janzen, 1992). Le bilan du carbone dans le secteur agricole n'a pas été dressé, faute de données. On s'efforce cependant de corriger la situation et d'ainsi mieux comprendre le rôle de l'agriculture (Benzing-Purdie, 1992).

Bref, les bonnes pratiques de gestion, favorables à la croissance végétale, permettent de piéger le carbone et, dans

certains cas, compensent les pertes dues aux émissions accompagnant la synthèse des engrais. Ne pas utiliser d'engrais azotés, lorsque ces derniers sont nécessaires, nuirait le plus souvent à l'environnement en ralentissant la production d'une biomasse protectrice.

Les autres sources rejetant du CO_2 dans l'atmosphère comprennent la respiration animale, y compris humaine, et la fermentation, telle celle qui accompagne la vinification. Comme la source de carbone est constituée de matière végétale (aliments et autres produits de l'agriculture), le flux net de cet élément vers l'atmosphère est supposé égaler le flux annuel de séquestration du carbone par la photosynthèse. En conséquence, il n'y a pas d'estimation des sources et des puits dans le présent rapport.

3.1 Le secteur forestier canadien

À l'échelle planétaire, les écosystèmes forestiers sont à l'origine d'environ la moitié (100 Mt) des échanges annuels de CO_2 en tant que carbone avec l'atmosphère et ils constituent de vastes réservoirs de carbone, de l'ordre d'environ 1 500 et de 650 Mt (sols et biomasse sur pied, respectivement) (Apps et Kurz, 1991).

Un modèle théorique complet du bilan du carbone des forêts canadiennes et des produits forestiers canadiens (Kurz, Apps, Webb et McNamee, 1991) permet d'évaluer le rôle de nos forêts. Il repose beaucoup sur les données que l'on possède actuellement sur les réservoirs de carbone que sont la biomasse, les sols ainsi que les produits forestiers. Il simule cinq régimes de perturbation : les incendies de forêt, la mortalité des peuplements provoquée par l'attaque des insectes, la coupe à blanc, la coupe à blanc suivie du brûlage des rémanents et la coupe partielle. Il englobe la dynamique spatio-temporelle de quatre grands réservoirs de carbone : la biomasse forestière, les sols forestiers, les tourbières et les produits forestiers. Les données sur la biomasse forestière ont été compilées à partir de l'«Inventaire de la biomasse forestière du Canada» (Bonnor, 1985) et de l'«Inventaire des forêts du Canada, 1986» (Forêts Canada, 1988). La dynamique du carbone des sols forestiers comprend le carbone des débris végétaux et le carbone de la couverture morte. Le secteur des produits forestiers, qui comprend tout le bois récolté selon le sous-modèle de la biomasse forestière, permet de prédire le rythme et la forme dans laquelle le carbone renfermé dans ce bois sera libéré dans l'atmosphère. Le modèle examine le devenir de la biomasse récoltée en suivant cette dernière tout au long de son façonnage et de sa transformation en produits, en tenant compte des pertes (à la récolte, au cours du transport, au cours de la fabrication de la pâte et du débitage en scierie) ainsi que de la durée de vie des produits. Le quatrième réservoir est constitué des tourbières. Des détails sur le modèle sont donnés dans divers ouvrages cités dans les références (Apps et Kurz, 1991; Kurz, Apps, Webb et McNamee, 1991 et 1992).

Le tableau 6 renferme les résultats obtenus à l'aide du modèle du bilan du carbone appliqué au secteur forestier canadien (Kurz, Apps, Webb et McNamee, 1992), modèle qui s'appuie sur les données de 1986 sur la biomasse et sur la moyenne des incendies de forêt sur une période de dix ans. La figure 4 présente ces données sous forme graphique.

Sur les 997 millions d'hectares de superficie terrestre du Canada, 453, soit environ 45 %, sont couverts de forêts. Quelque 82 % de la superficie forestière se trouve dans la zone boréale, le reste dans la zone tempérée (Vineberg et Boyle, 1991).

Les statistiques recueillies durant la période qui va du milieu des années 1970 jusqu'au milieu de la décennie suivante montrent que la modification de la superficie forestière provoquée par le changement d'occupation des sols est négligeable, c'est-à-dire que les

Tableau 6 Bilan du carbone dans le secteur forestier canadien (Mt de carbone)[a]

Réservoirs de carbone	Puits	Source	Transfert	Changement net
Biomasse forestière	92	-20	-99	-27
Sols forestiers	17	-15	55	57
Produits forestiers	-	-23	44	21
Tourbières	26	-	-	26

[a] Les nombres positifs représentent une augmentation des réserves de carbone, les nombres négatifs des dégagements atmosphériques ou des transferts vers d'autres réservoirs de carbone.

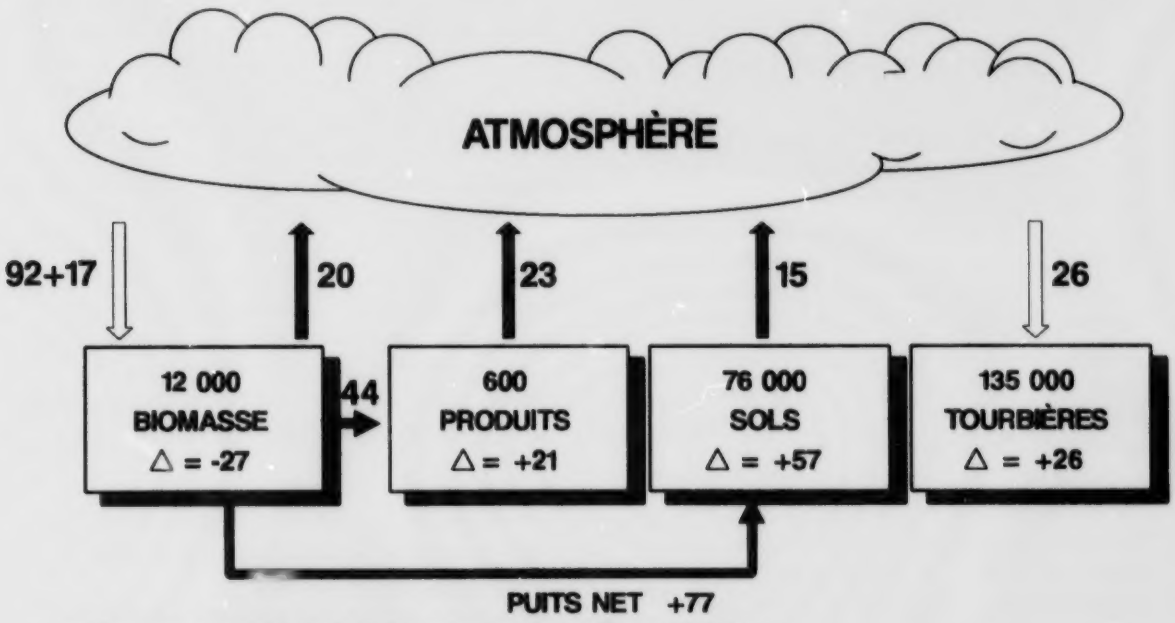


Figure 4 Bilan du carbone dans le secteur forestier canadien

pertes nettes de 4,7 millions d'hectares de matériel sur pied de qualité marchande ont été compensées par l'augmentation du stock en croissance sur les terrains forestiers productifs (Kuhnke, 1989; Vineberg et Boyle, 1991).

Durant les trois années de la période 1983-1984 à 1985-1986, 1 965 353 ha de forêt ont été coupés et 1 438 647 ha ont été régénérés par plantation, ensemencement et par des processus naturels (Kuhnke, 1989). Au Canada, l'accroissement forestier varie de 0,2 à 5,7 $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot an^{-1}$, la moyenne étant de 1,5 (Power, 1989). Cet accroissement varie selon les caractéristiques de la station et du peuplement (essence, structure, âge, climat, abondance de l'eau et des éléments nutritifs

ainsi que pratiques sylvicoles). Il varie donc dans tout le Canada.

3.2 *Les sources*

Les estimations qui suivent font partie des totaux calculés par le modèle du bilan du carbone. À cause des contraintes touchant les résultats du modèle et de la méthode d'estimation des flux nets, et non de la valeur absolue des émissions et des puits, certaines des émissions traitées dans les paragraphes qui suivent ont été estimées de façon indépendante du modèle. La recherche doit se poursuivre afin d'examiner plus complètement le secteur forestier et d'obtenir un bilan plus détaillé du carbone.

3.2.1 *Liqueurs noires et déchets de bois écrasés*

Dans l'industrie des pâtes et papiers, les émissions de CO_2 sont surtout dues à la combustion des liqueurs noires et des déchets ligneux (p. ex., copeaux et écorces). Les deux principaux procédés de préparation des pâtes chimiques sont le procédé *bisulfitique*, qui se déroule à pH faible (conditions acides) et le procédé *kraft*, qui a lieu en conditions basiques. Même si les diverses liqueurs blanches possèdent une large gamme de compositions chimiques (tableau 7), le procédé kraft domine. C'est donc la valeur moyenne entre le procédé kraft et le procédé bisulfitique acide qui fut retenue, car elle est représentative de la teneur en carbone des liqueurs noires. Le volume de ces liqueurs a été communiqué par Statistique Canada (Statistique Canada, 1991a). Compte tenu d'un taux moyen de 41 % de carbone en poids dans les liqueurs noires, et puisque ces dernières totalisaient 19 423 kt de matières sèches et que le taux de transformation du carbone en CO_2 était de 95 %, les émissions de ce gaz dans le secteur des pâtes et papiers ont été estimées à 27,7 Mt.

En 1990, la quantité des déchets ligneux brûlés pour la transformation en énergie s'élevait à 5 531 kt (Statistique Canada, 1991a). Le coefficient d'émission étant de 1,5 kg de CO_2 par kilogramme de bois, les émissions de CO_2 sont estimées à 8,3 Mt.

3.2.2 *Brûlage dirigé*

Le brûlage dirigé vise à améliorer l'habitat et la répartition de la faune ou à préparer les stations, après la coupe forestière. C'est un important moyen d'aménagement du territoire. Après la coupe, le brûlage dirigé (brûlage des rémanents) vise surtout à déclencher ou à favoriser la régénération forestière. On brûle également les rémanents pour réduire le risque d'incendie de forêt et pour lutter contre les insectes. L'opération dégage des quantités considérables de CO_2, mais, faute de brûler les rémanents, une grande partie du carbone que ceux-ci renferment aurait fini par être libérée sous forme de CO_2 durant la putréfaction. En outre, une grande partie du CO_2 est récupérée par la nouvelle forêt. Le plus souvent, le brûlage dirigé consume les combustibles fins et la litière forestière. Ces matériaux fins, biodégradables, se seraient vraisemblablement décomposés en moins d'un à dix ans après la récolte. La plus grande partie du carbone participant à cette décomposition aurait fini par être libérée sous forme de CO_2, mais une partie s'intégrerait aux horizons pédologiques. Le brûlage dirigé n'équivaut donc pas nécessairement à une augmentation nette des concentrations de CO_2 atmosphérique à long terme (Forêts Canada, 1990a).

Les estimations du présent rapport se fondent sur la moyenne décennale des incendies (1980-1989) et elles découlent de renseignements fournis par Forêts Canada (Stocks, 1990). Même s'il s'agit des meilleures données disponibles, elles sont difficiles à mesurer et elles varient énormément d'une région à l'autre. Le coefficient d'émission du CO_2 qui entre dans mes calculs est de 1 500 g de CO_2 par kilogramme de combustible consumé. Les quantités consumées sont données au tableau 8.

3.2.3 *Incendies de forêt*

Les incendies de forêt ne sont pas considérés comme une cause anthropique d'émissions de CO_2. Ils sont néanmoins une cause majeure d'émissions de ce gaz. Les émissions

Tableau 7 Composition des liqueurs noires

	Pâte bisulfitique acide pour transformation chimique	Pâte bisulfitique acide pour transformation en papier	Pâte à papier bisulfitique	Pâte bisulfitique neutre (mi-chimique)	Pâte kraft
Bois (%)	68	64	74	46	74
Liqueurs noires (%)	13 à 17	12 à 16	14 à 18	9 à 11	17 à 22
Cendres (% du total)	10 à 12	12 à 14	18 à 20	35 à 45	35 à 45
Carbone (%)	43	40	35	29	42
Hydrogène (%)	5	5	4	4	5
Oxygène (%)	42	42	42	44	35
Soufre (%)	6	8	11	8	3
Sodium (%)	4	5	8	15	15
Pouvoir calorifique (Mcal/t de matières solides totales)	4 500	4 300	3 500	3 000	3 900

(Source : Rydholm, 1965)

Tableau 8 Quantités de combustible consumé du fait du brûlage dirigé

Province	Type	Superficie brûlée (ha)	Combustible consumé(kg/m^2)	Émissions de CO_2 (Mt)
Colombie-Britannique	Sylviculture	53 992	8,0	6,5
	Habitat faunique et parcours	44 205	2,0	1,3
Ontario	Transformation des stations	3 384	8,1	0,4
	Récolte	4 308	5,9	0,4
Total		105 889		8,6

estimées par Forêts Canada (Stocks, 1990) se fondent sur la superficie moyenne brûlée chaque année dans chaque région écoclimatologique de 1980 à 1989. Les estimations s'appuient sur un coefficient d'émission du CO_2 de 1 500 g par kilogramme ainsi que sur la quantité de combustibles consumée dans chaque région. Les émissions annuelles totales de CO_2 provoquées par les incendies de forêt au Canada sont estimées à 99 Mt (tableau 9).

Tableau 9 Émissions de dioxyde de carbone attribuables aux incendies de forêt

Région écoclimatologique	Superficie brulée ($\times 10^3$ ha)	Combustible consumé (kg/m^2)	Émissions de CO_2 (Mt)
Boréale	1 760	2,5	66,0
Subarctique	560	1,8	15,1
Cordillères	150	7,4	16,7
Prairie	9	0,3	0,0
Cordillières de l'intérieur	7	3,2	0,3
Tempérée fraîche	5	2,0	0,2
Cordillères subarctiques	3	2,0	0,1
Cordillères du Pacifique	2	14,2	0,4
Total	**2 496**		**98,8**

3.2.4 Bois de chauffage

Le bois utilisé pour le chauffage des habitations et pour la production d'énergie dans l'industrie entre dans cette catégorie. Les estimations des quantités utilisées se fondent sur les résultats d'une étude de l'emploi du bois pour le chauffage domestique et sur des données sur l'énergie communiqués par Statistique Canada (EMR, 1984; Statistique Canada, 1991a). Les émissions ont été calculées à partir d'un coefficient de 1,5 kg par kilogramme de bois brûlé. La quantité de bois utilisé dans les ménages du Canada, en 1990, a été estimée à 11,4 Mt, tandis que l'utilisation des déchets ligneux pour la production d'énergie a été estimée à 5,4 Mt. À partir de ces chiffres, les émissions estimatives de CO_2, en 1990, totalisent 25 Mt.

3.2.5 Incinération

Les émissions dégagées par les incinérateurs de déchets sont imputables aux ordures ménagères, aux déchets industriels et aux déchets ligneux. On continue de chercher à déterminer la proportion des déchets d'origine urbaine et industrielle qui ne tirent pas leur origine de la biomasse et qui, de ce fait, devraient être classés dans les matières non renouvelables.

Incinération des ordures ménagères. L'opération permet de réduire le volume des déchets solides. Certains incinérateurs conviennent mieux à des déchets possédant certaines caractéristiques. Ordinairement, les incinérateurs municipaux comportent des chambres de combustion à parois réfractaires ou à écran d'eau, sur la grille desquelles les déchets sont brûlés.

Les émissions de CO_2 dépendent presque entièrement de la teneur des déchets en carbone et, par conséquent, de la teneur énergétique des déchets. À partir d'un coefficient d'émission de 0,9 kg de CO_2 par kilogramme de déchets incinérés et d'une quantité d'environ 900 kt d'ordures ménagères, les émissions estimatives sont, en 1990, de 0,8 Mt.

Incinération des boues résiduaires. Les boues résiduaires sont le sous-produit du traitement des eaux usées. Durant leur incinération, elles sont débarrassées de leur humidité avant de prendre feu, tandis que la température est élevée jusqu'au point

d'allumage. On peut avoir besoin d'air et de combustible d'appoint pour amorcer et maintenir la combustion. Les cendres inorganiques sont ensuite refroidies puis éliminées. Dans trois installations, on utilise des fours à soles multiples, tandis qu'ailleurs on utilise des incinérateurs à lit fluidisé. D'après un coefficient d'émission de 0,66 kg de CO_2 par kilogramme de boues sèches, les émissions estimatives sont de 0,07 Mt.

Incinération industrielle. Les incinérateurs industriels et commerciaux sont habituellement capables de brûler 25 à 1 800 kg de déchets à l'heure. Le modèle le plus répandu est à chambres multiples, dans lesquelles les gaz de la chambre primaire passent dans une chambre secondaire plus petite, de mélange, où on introduit de l'air excédentaire pour assurer une combustion plus complète.

On pose par hypothèse que les trois quarts des déchets sont incinérés dans des modèles à chambres multiples, les autres dans des incinérateurs à air contrôlé. Ces derniers brûlent les déchets en déficit de l'air qui assurerait la combustion complète. Les émissions ont été estimées comme celles de l'incinération des ordures ménagères, c'est-à-dire à partir d'un coefficient de 0,9 kg de CO_2 par kilogramme de déchets. À partir également d'une quantité de 500 kt de déchets incinérés, on estime les émissions de CO_2 à 0,5 Mt.

Incinération des déchets ligneux. Dans l'industrie du bois et du contreplaqué, on élimine la sciure dans des incinérateurs coniques. On a estimé le tonnage ainsi éliminé à partir de la production de bois de construction, c'est-à-dire à environ 5 000 kt. À partir d'un coefficient d'émission de 1,5 kg de CO_2 par kilogramme de bois, on estime les émissions de CO_2 à 7,5 Mt en 1990.

3.2.6 Décharges municipales

Les gaz libérés par les lieux d'enfouissement, du CH_4 et du CO_2 surtout, proviennent de la décomposition anaérobie des déchets organiques biodégradables, phénomène qui commence de 10 à 50 jours après la mise en décharge. Même si le gros de la production de CH_4 et de CO_2 se situe dans les 20 années qui suivent l'enfouissement, le phénomène peut se poursuivre pendant encore au moins un siècle.

Un certain nombre de facteurs locaux importants contribuent à la production de gaz :

La composition des déchets. C'est probablement le premier facteur de la vitesse et du volume de production de gaz. On sait que les différents types de déchets se décomposent à des vitesses différentes, vitesses qui peuvent, cependant, dépendre de conditions locales.

L'humidité. L'humidité à l'intérieur du lieu d'enfouissement est un autre facteur important de la production de gaz, puisqu'un milieu aqueux est nécessaire à la dégradation anaérobie des déchets.

La température. Comme la digestion anaérobie est exothermique, la température interne du lieu d'enfouissement tend à être plus élevée que la température ambiante de l'air. L'influence de cette dernière sur la vitesse de production du gaz dépend surtout de la profondeur de l'enfouissement.

Le pH et la capacité tampon. La production de CH_4 dans les lieux d'enfouissement est maximale lorsque le pH correspond à une acidité nulle. En milieu acide, l'activité des bactéries méthanisantes est inhibée.

Les éléments nutritifs. Certains éléments nutritifs sont nécessaires à la digestion anaérobie : carbone, hydrogène, azote et phosphore. En général, les déchets solides urbains renferment les éléments nutritifs nécessaires à la méthanogenèse.

Densité et granulométrie des déchets. Ces paramètres influent également sur la

Tableau 10 Vitesses de production de gaz dans les décharges

Auteur(s)	Quantité [$m^3/(t \cdot an)$]	Observations
1. Ramaswami (1970)	$0{,}28 \times 10^4$	Étude de laboratoire - fort pourcentage de matières facilement biodégradables
2. Rovers et Farquhar (1973)	$0{,}07 \times 10^2$	Étude de laboratoire - peu de CH_4 produit
3. Augenstein *et al.* (1976)	$0{,}05 \times 10^4$, max. ($0{,}17 \times 10^2$, moyenne)	Étude de laboratoire - conditions optimisées
4. DeWalle *et al.* (1978)	$0{,}05 \times 10^3$, max. (moyenne de 0,1 à 13×10^2)	Étude de laboratoire - peu de CH_4 produit
5. Buivid (1980)	$0{,}03 \times 10^5$, max. (moyenne de $0{,}25 \times 10^2$ à $0{,}05 \times 10^4$)	Étude de laboratoire conditions optimisées
6. Pohland (1980)	$0{,}03 \times 10^3$, max. ($2{,}0 \times 10^1$, moyenne)	Étude de laboratoire - faible taux de conversion de la DCO
7. Emcom (1981)	$0{,}07 \times 10^2$	Essais de pompage sur le terrain
8. Klink et Ham (1982)	$0{,}26 \times 10^3$	Études de laboratoire -fort taux d'humidité durant le recyclage des percolats
9. Jenkins et Pettus (1985)	$0{,}04 \times 10^3$ ($0{,}13 \times 10^3$, max. à court terme)	Incubation d'échantillons prélevés sur place
10. Pacey et Dietz (1986)	$0{,}03 \times 10^3$	Cellule de contrôle sur place, projet de Mountain View
11. Emberton (1987)	$0{,}08 \times 10^3$ $0{,}08 \times 10^3$	En laboratoire (avec des échantillons prélevés sur le terrain) Sur le terrain
12. Barlaz *et al.* (1987)	$0{,}2 \times 10^3$	Études en laboratoire avec 50 % des ordures fraîches déchiquetées et 50 % de déchets huileux
13. Argonne National Lab (1988, inédit)	$0{,}2 \times 10^2$ à $0{,}14 \times 10^3$	Détermination du potentiel de dégagement de méthane biochimique des percolats prélevés sur le terrain
14. GSF Energy	$0{,}08 \times 10^2$ (moyenne) $0{,}25 \times 10^1$ (min. moyen) $0{,}18 \times 10^2$ (max. moyen)	Résultats de puits d'essai de 23 décharges municipales

(Source : McGuinn, 1988)

production du gaz, puisqu'ils influent sur le transport des éléments nutritifs et de l'humidité dans le lieu d'enfouissement.

Tous ces facteurs agissent de concert pour déterminer la capacité de production du gaz et la constante de vitesse de cette production pour une décharge donnée. Le tableau 10 donne les différentes vitesses de production de gaz qui ont été signalées dans les publications scientifiques. Le CH_4 entre pour environ la moitié dans la composition de ces gaz. Afin de déterminer le volume de CO_2 dégagé, on a posé que la moitié de tout le gaz dégagé était du CO_2.

L'estimation des émissions totales de CO_2 dans les décharges du Canada se fonde sur les résultats du modèle informatisé Scholl Canyon (*cf.* subdivision 4.1.6), utilisé pour déterminer les émissions de CH_4 dans les décharges du Canada. On estime que 3,9 Mt de CO_2 ont été libérées dans l'environnement, en 1990, par les déchets en décomposition.

3.3 Puits

Les principaux puits de carbone dans les écosystèmes forestiers du Canada ont été décrits dans le modèle de bilan du carbone pour le secteur forestier du Canada (Apps et Kurz, 1991) et ils sont montrés au tableau 3. En vertu de la conception du modèle (qui estime les transferts nets de carbone entre les réservoirs de cet élément), on ne peut pas quantifier facilement la valeur absolue des puits et des sources. Néanmoins, les principaux puits sont constitués du matériel biologique sur pied, des sols, des océans et des tourbières. Des travaux de recherche visent à parfaire ces estimations et à en obtenir pour le secteur agricole.

Section 4

Émissions de méthane

Ces émissions, tant anthropiques que naturelles, ont été estimées. J'en décris chaque source importante ainsi que la méthode d'estimation. Faute de résultats de mesures, l'estimation est descendante, c'est-à-dire qu'elle est nationale, fondée sur des coefficients moyens, qui peuvent convenir ou ne pas convenir à certaines régions du Canada. En outre, dans certains cas, particulièrement le traitement des eaux usées, les émissions n'ont pas été estimées. On s'efforce cependant de quantifier ces dernières et toutes les autres sources qui pourraient avoir été omises. Désormais, les inventaires nationaux seront dressés selon la méthode ascendante et ils s'appuieront davantage sur les données fournies par les provinces et l'industrie. Le sommaire des émissions de CH_4 est donné au tableau 11.

4.1 Sources anthropiques

4.1.1 Extraction du charbon

Durant la formation du charbon, il y a également production de CH_4. La teneur des gisements de charbon en CH_4 dépend d'un

Tableau 11 Sommaire des émissions de méthane au Canada

	Émissions annuelles (kt de CH_4)	Pourcentage du total
Émissions anthropiques		
Décharges municipales	1 405	37,61
Exploitations du pétrole et du gaz d'amont	1 000	29,44
Animaux domestiques	655	17,53
Fumiers	345	9,23
Traitement des eaux usées	-	-
Distribution du gaz naturel	18	0,48
Mines de charbon	143	3,83
Utilisation des combustibles et des carburants	32	0,86
Sources fixes (9)		
Moyens de transport (23)		
Brûlage dirigé	38	1,02
Total partiel	**3 736**	**100,00**
Émissions naturelles		
Terres humides	24 000	
Incendies de forêt	980	
Animaux sauvages	100	
Total partiel	**25 080**	
Total (toutes les sources)	**28 816**	

certain nombre de facteurs, y compris le rang (le degré de houillification), la pression, la température, le degré de fracturation, la distance jusqu'à l'affleurement et la perméabilité des strates contiguës (Kim, 1978). Même si la teneur en CH_4 des dépôts non perturbés augmente généralement selon le rang et la profondeur et qu'elle diminue avec la température, la perméabilité et la fracturation, elle peut varier considérablement par rapport aux valeurs prédites en se fondant sur des facteurs tels que le rang ou la profondeur (Kim, 1978; Hollingshead, 1990).

Plusieurs estimations des émissions de CH_4 accompagnant l'extraction du charbon au Canada existent (Environnement Canada, 1990; Masszi et Proudlock, 1990; Hollingshead, 1990). L'estimation se fonde sur les travaux de Hollingshead (Hollingshead,1990) et sur l'analyse de ces travaux par Stewart (Stewart, 1990). Même si, au Canada, le gros du charbon est extrait de mines à ciel ouvert, situées pour la plupart dans les provinces de l'Ouest, environ la moitié des émissions proviennent des mines profondes de l'île du Cap-Breton, qui produisent environ 4 % du charbon au pays. Les estimations ci-dessous se situent dans le bas de l'intervalle des estimations données par Hollingshead (Hollingshead, 1990).

Toute méthode d'estimation des émissions du CH_4 selon laquelle ce gaz est un constituant des réserves de gaz naturel doit tenir compte de sa désorption dans le temps. Dans l'Ouest, les mines de charbon sont peu profondes et elles sont situées dans des strates perturbées par des phénomènes tectoniques et périglaciaires. La désorption du CH_4 durant les périodes géologiques a donc été considérable. Pour divers rangs du charbon, les courbes d'étalonnage de l'adsorption du CH_4 en fonction de la profondeur aboutissent à une surestimation considérable des teneurs en CH_4 mesurées dans les mines de charbon de l'Ouest (Stewart, 1990).

Mines à ciel ouvert. Dans ces mines de l'Ouest, la plus grande partie du CH_4 trouvée dans le charbon superficiel est un gaz résiduel qui ne désorbe plus. Dans huit échantillons de charbon obtenus par forage dans la mine Genesee, la teneur résiduelle en gaz se situait en moyenne à 46 % de la teneur totale en CH_4. Des pourcentages élevés de cet ordre ont été observés dans d'autres charbons de l'Ouest. Les estimations des émissions reposent donc sur l'hypothèse que 54 % seulement de tout le CH_4 renfermé dans le charbon des mines à ciel ouvert de l'Ouest canadien est désorbable. En outre, les mines de charbon à ciel ouvert sont exploitées par enlèvement du terrain sus-jacent, qui renferme des matériaux riches en carbone, opération qui soulage les roches sous-jacentes des contraintes auxquelles elles sont soumises. Ainsi, le CH_4 se dégage des roches du dessus et des roches sous-jacentes, en sus du charbon extrait. Selon un ouvrage cité dans les références (Hollingshead, 1990), le gaz renfermé dans le charbon canadien extrait des mines à ciel ouvert totalise $46{,}2 \times 10^6$ m^3. Si l'on pose qu'une fraction seulement de tout le gaz est désorbable, par exemple 54 %, l'estimation des émissions serait de 25×10^6 m^3/a. Les émissions des mines à ciel ouvert sont chiffrées au tableau 12.

Les estimations des émissions et les coefficients d'émission reposent sur une quantité d'extraction d'environ 64 000 kt de charbon par année. Les émissions de CH_4 dégagé du charbon ont été calculées comme suit :

$$0{,}54 \times 46{,}2 \times 10^6 \text{ m}^3\text{/a} \times 0{,}72 \text{ kg/m}^3 \times 10^{-6} \text{ t/kg} = 17{,}96 \text{ kt/a}$$

On a posé que les dégagements de CH_4 de la couche sus-jacente ainsi que de la roche sous-jacente (17,96 kt) étaient environ trois fois plus intenses que les dégagements qui accompagnent l'extraction du charbon (53,89 kt). Le coefficient moyen d'émission est donc de 1,12 kg de CH_4 par tonne de charbon extrait.

Mines souterraines. Elles dégagent, estime-t-on, entre 66 et 105×10^6 m^3 de CH_4

Tableau 12 Émissions estimatives de méthane des mines à ciel ouvert

Bassin charbonnier et mine	Émissions estimatives ($\times 10^6$ m^3/a) Min.	Max.	Bassin charbonnier et mine	Émissions estimatives ($\times 10^6$ m^3/a) Min.	Max.
Colombie-Britannique			Alberta		
Bassin Elk Valley			Bassin Cadomin-Luscar		
Fording River	9,3	56	Cardinal River	3,3	19
Westar Greenhills	6,3	38	Gregg River	3,1	18
Line Creek	4,2	25			
			Bassin Wabamun		
Bassin Peace River			Highvale	4,1	13
Quintette	3,7	17	Whitewood	1,0	3
Bullmoose	1,4	6	Genesee	0,5	2
Bassin Crowsnest			Bassin Coalspur		
Westar Balmer	5,9	28	Coal Valley	1,8	8
Coal Mountain	0,8	4			
			Bassin Obed Mountain		
Bassin Comox			Obed Marsh	0,9	4
Quinsam	0,0[a]	0			
			Bassin Smoky River		
Saskatchewan			Smoky River	0,1	3
Bassin Willow Bunch					
Poplar River	0,0	0	Bassin Battle River		
			Paintearth	0,2	1
Bassin Estevan			Vesta	0,1	1
Boundary Dam	0,0	0			
Utility	0,0	0	Bassin Sheerness		
Costello	0,0	0	Montgomery	0,2	1
Bienfait	0,0	0			
			Bassin Lethbridge		
Nouveau-Brunswick			Kipp	0,0	0
Bassin Grand Lake					
Minto	0,0	0			
Total partiel	**31,6**	**174**		**15,3**	**73**
Total				**46,9**	**247**

(Source : Hollingshead, 1990)

Notes explicatives concernant les valeurs nulles du tableau :

1. Le bassin Comox (mine Quinsam) : teneur déduite en CH_4 faible (0,1 à 0,3 m^3/t); faible production (0,35 Mt/a).
2. Bassin Lethbridge (mine Kipp) : aucune production de charbon.
3. Champs de la Saskatchewan (mines de lignite) : teneur déduite en CH_4 très faible (0,0 à 0,1 m^3/t); on estime que les émissions maximales sont de l'ordre de $0,28 \times 10^6$ m^3/a.
4. Bassin Grand Lake (mine Minto) : teneur déduite en CH_4 très faible (0,1 à 0,2 m^3/t); faible production (~0,5 Mt/a).

par année (Hollingshead, 1990). Stewart (Stewart, 1990) a estimé les dégagements annuels à 90×10^6 m^3. C'est à la lumière de ces renseignements que les émissions de CH_4 des mines souterraines canadiennes de charbon ont été estimées.

Si environ 3 940 kt de charbon sont extraites chaque année, les émissions annuelles moyennes de CH_4 seraient de 90×10^6 m^3 ou 64,8 kt (en supposant au gaz une masse volumique de 0,72 kg/m^3). Le coefficient moyen d'émission est donc de 16,45 kg de CH_4 par tonne de charbon extrait.

Compte tenu de l'origine du charbon au Canada et de sa production en 1990 (mines à ciel ouvert, 64,4 kt; mines souterraines, 4,0 kt) ainsi que des coefficients d'émission calculés dans les paragraphes qui précèdent, les émissions de CH_4 attribuables à l'extraction du charbon au Canada ont été estimées à 143 kt en 1990.

Un sommaire des estimations détaillées élaborées par Hollingshead (Hollingshead, 1990) est donné dans les tableaux 12 et 13. Les estimations dans le présent rapport se fondent sur une analyse des travaux de cet auteur. Consulter les rapports de première main, pour obtenir plus de renseignements.

4.1.2 Exploitation du pétrole et du gaz d'amont

En mars 1992, l'Association pétrolière du Canada (APC) a publié un rapport en trois volumes intitulé «A Detailed Inventory of CH_4 and VOC Emissions from Upstream Oil and Gas Operations in Alberta» (Picard, Ross et Koon, 1992). Les résultats de cette évaluation approfondie du secteur pétrolier et gazier d'amont, bien que celle-ci fut limitée à l'Alberta, ont servi de base aux estimations faites pour l'ensemble du Canada.
L'inventaire s'est effectué en trois étapes : préparation d'un inventaire préliminaire, validation, sur le terrain, des principaux motifs d'incertitude, ainsi que révision et réalisation de l'inventaire.

Dans le rapport de l'APC, le secteur pétrolier et gazier d'amont est défini comme l'ensemble des infrastructures qui servent à découvrir, à produire, à transformer ou à traiter et à transporter le gaz naturel, le gaz de pétrole liquéfié, les condensats, le pétrole brut, les huiles lourdes et le bitume brut. En sont exclues les émissions de la valorisation des huiles lourdes, de l'extraction des sables bitumineux et des traitements consécutifs, de la consommation de combustibles et de carburants durant les travaux de construction dans les champs pétrolifères et durant le transport. Les émissions de CH_4 ont été calculées par l'application des profils des différentes espèces chimiques aux estimations des hydrocarbures totaux (*cf.* tableau 14). Les précisions sur les modalités des calculs se trouvent dans le document susmentionné (Picard, Ross et Koon, 1992).

Malheureusement, on ne possède d'estimations détaillées que pour l'Alberta. Dans l'avenir, on s'efforcera d'en calculer pour tout le Canada, au degré de précision du rapport de l'APC. Les pratiques industrielles en Alberta et à l'extérieur peuvent différer considérablement et se traduire par des émissions très différentes. Néanmoins, pour les besoins de l'étude, les estimations se rattachant à l'Alberta, au prorata de la production canadienne, ont été extrapolées à l'ensemble du Canada (Statistique Canada, 1991a et b). Les émissions totales de CH_4 au Canada, y compris les émissions découlant de la production et du transport du gaz naturel, ont été estimées à 1 100 kt en 1990.

4.1.3 Distribution du gaz naturel

Les fuites de CH_4 dans l'industrie du gaz naturel sont estimées représenter entre 0,3 et 0,5 % de toute la production de gaz au Canada.

Les émissions de CH_4 ont été estimées à la lumière d'une analyse des pertes subies à la distribution par les compagnies membres de l'Association canadienne du gaz (ACG) (ACG, 1989; Wilson, 1990). Le faible taux

Tableau 13 Émissions de méthane des mines souterraines

Bassin houiller et mine	Émissions mesurées			Teneur du méthane *in situ* (m^3/t)	Émissions estimatives totales	
	Système de ventilation par unité de temps (10^6 m^3/a)	Propre au système (m^3/t extraite)	Évacuation du méthane (m^3/t extraite)		Min. (10^6 m^3/a)	Max. (10^6 m^3/a)
Sydney						
Lingan	18 à 30[a]	-	4 à 5	7[b]	32	49
Phalen	20 à 34	-	-	2,5	23	39
Prince	7 à 11	-	-	2,5	10	15
Smoky River						
Smoky River	-	1,7 à 2,7[c]	-	-	1,4	2,3

(Source : Hollingshead, 1990)

[a] Valeurs découlant de la valeur donnée par Klanowski (1990). La valeur composée donnée pour les trois mines Sydney était de 2 m^3/s (ce qui équivaut à 60×10^6 m^3/a). Par hypothèse, on lui a attribué une marge d'incertitude de ±25 % et on l'a distribuée entre les trois mines selon le rapport 45:40:15, respectivement pour les mines Phalen, Lingan et Prince, d'après la production relative des trois mines et la teneur en méthane *in situ*.

[b] Le taux de méthane retenu dans le charbon extrait, qui se dégage après l'extraction est, pour les charbons Sydney, est d'environ 90 %, et pour les charbons Smoky River, d'environ 10 %.

[c] Valeurs découlant de la valeur donnée par Kapur (1990), laquelle est de 2,24 m^3 par tonne extraite. Par hypothèse, on attribue aux valeurs une incertitude de ±25 %, ce qui donne l'intervalle des valeurs citées dans le tableau.

Tableau 14 Émissions de méthane attribuables à l'exploitation pétrolière et gazière d'amont, en Alberta

Secteur	Émissions (kt)	Pourcentage du total
Forage	5	0,62
Entretien et essai des puits	4	0,49
Production de gaz	297	37,86
Production pétrolière ordinaire	88	11,19
Production d'huiles lourdes	199	25,35
Production de bitume brut	19	2,43
Traitement du gaz	71	9,09
Transport des produits	38	4,78
Accidents et pannes	64	8,19
Total	**785**	**100,00**

(Source : Picard, Ross et Koon, 1992)

de 0,3 % est vraisemblablement dû au fait que les installations et les réseaux canadiens sont généralement plus neufs que les installations et réseaux d'ailleurs dans le monde et qu'ils sont d'une qualité supérieure. Les estimations des sociétés de transport se fondent, quant à elles, sur les reçus de production, sur les fuites inexplicables et sur les pannes se produisant au gazoduc principal et dans les stations de compression. Les réseaux de distribution au Canada sont continuellement surveillés au moyen d'une technique de détecteur à ionisation de flamme, et le taux de fuite y est estimé à 0,03 %.

L'ACG chiffre les pertes totales à la production à environ 0,25 % de la production brute. En appliquant ce taux à la production brute de gaz naturel au Canada en 1990, on arrive à une estimation de 250 kt de CH_4. Comparativement aux chiffres du rapport de l'APC (fondés sur des analyses détaillées des types de matériel en exploitation en Alberta, des émissions auxquelles, ordinairement, ils donnent chacun lieu et des diverses opérations des réseaux de gazoduc, des stations de compression, des stations de mesure et des parcs de réservoirs), les fuites de CH_4 semblent sous-estimées. Malheureusement, l'étude de l'APC n'entre pas suffisamment dans le détail pour ventiler davantage les estimations figurant au tableau 14. Comme on ne connaît pas encore la fraction uniquement attribuable aux fuites dans les émissions qui accompagnent la production de gaz et dont traite le rapport de l'APC, le tableau 11 ne présente que les pertes en aval ou les pertes survenant à la distribution. Le tableau 15 résume les fuites de CH_4 accompagnant la distribution du gaz naturel.

4.1.4 Utilisation des combustibles et des carburants

Les émissions de CH_4 qui accompagnent l'utilisation des carburants (sources mobiles) et des combustibles (sources fixes) entrent dans cette catégorie. Les coefficients d'émission qui ont servi à les estimer ont été élaborés pour la majorité par l'EPA et ils ont été tirés de plusieurs publications (National Acidic Precipitation and Assessment Program, 1987; EPA, 1985; OCDE, 1991).

Tableau 15 Fuites de méthane accompagnant la distribution du gaz naturel

		Émissions de CH_4 (kt)[a]
Production brute	138 890,5 GL[b] (Fuites à la production : 0,25 %)	250
Production commercialisable	98 770,8 GL[b] (Fuites au cours du transport : 0,03 %)	21
Fuites à la distribution	(La moitié de la production commercialisable × 0,05 %)	18
Masse volumique du CH_4	0,72 kg/m^3	
Total		**289**
Coefficient moyen d'émission :	2,08 g de CH_4/m^3 de gaz naturel produit	

[a] D'après l'Association canadienne du gaz (1989)
[b] D'après Statistique Canada (1991b)

La classification des véhicules selon le modèle *Mobile4* (*cf.* subdivision 2.3.1) a servi à estimer les émissions. Les coefficients cités dans le rapport du comité spécial (EMR, 1990) se fondaient sur des profils antérieurs selon lesquels on estimait que le CH_4 constituait 10 % des hydrocarbures totaux dégagés par la combustion des essences à moteur et 5 % des hydrocarbures dégagés par l'emploi du gazole. Ils pouvaient être jusqu'à trois fois trop élevés. Les coefficients utilisés figurent au tableau 16. Les émissions ont été estimées selon une méthode semblable à celle qui a servi aux émissions de CO_2 (*cf.* sous-section 2.3) et elles se fondent sur les statistiques de la consommation d'essence (Statistique Canada, 1991a) ainsi que sur la ventilation des moyens antipollution selon le type de véhicule (Terrillon, 1991), dont le tableau 17 donne un aperçu.

Pour le Canada, les estimations se fondent sur la moyenne pondérée de la ventilation des types de véhicules et des moyens antipollution ainsi que sur les taux d'efficacité des véhicules et sur les tendances de la consommation du carburant qui avaient servi au calcul des émissions de CO_2. Afin d'améliorer les estimations, celles-ci devraient tenir compte de la consommation de carburant dans chaque province. On a estimé les émissions des véhicules routiers comme suit : après avoir converti les résultats des mesures des émissions, exprimés en grammes par mille, en coefficients d'émission exprimés en grammes par kilogramme, on a multiplié ces coefficients par les chiffres nationaux de consommation du carburant. Un exemple de calcul est donné au tableau 18.

Autres moyens de transport. Les émissions de tous les autres moyens de transport (chemins de fer, bateaux et embarcations ainsi qu'aéronefs) ont été estimées à partir de la consommation de carburant de chaque catégorie (Statistique Canada, 1991a) et des coefficients convenables d'émission de chaque source (*cf.* tableau 19). En 1990, les émissions totales de CH_4 attribuables aux moyens de transport ont été estimées à 23 kt. Leur répartition est montrée à la figure 5.

Foyers fixes. Ils dégagent également un peu de CH_4 en raison de la combustion incomplète. Les sources qui entrent dans cette catégorie comprennent les foyers de

Tableau 16 Coefficients d'émission du méthane - véhicules automobiles

Source	Consommation de carburant (km/L)	Coefficients d'émission (g/km)	(g/kg)	(kg/TJ)
Automobiles				
Catalyseur trifonctionnel perfectionné	11,9	0,02	0,32	6,92
Catalyseur trifonctionnel primitif	9,4	0,04	0,50	10,82
Catalyseur d'oxydation	6,0	0,09	0,72	15,58
Absence de catalyseur	6,0	0,17	1,38	29,86
Utilitaires légers				
Catalyseur trifonctionnel perfectionné	9,4	0,04	0,50	10,80
Catalyseur trifonctionnel primitif	6,8	0,07	0,64	13,85
Catalyseur d'oxydation	5,1	0,09	0,61	13,24
Absence de catalyseur (essence)	5,1	0,17	1,16	25,02
Utilitaires lourds				
Catalyseur trifonctionnel	2,9	0,10	0,38	8,22
Absence de catalyseur	2,8	0,17	0,65	14,07
Absence de moyens antipollution	2,0	0,37	1,02	21,36
Motocyclettes				
Absence de catalyseur	14,9	0,15	2,98	64,46
Absence de moyens antipollution	12,8	0,33	5,60	12,41
Utilitaires légers				
Moyens antipollution perfectionnés	7,7	0,01	0,09	1,99
Moyens antipollution d'efficacité moyenne (gazole)	5,1	0,01	0,06	1,32
Absence de moyens antipollution	4,3	0,02	0,10	2,22
Utilitaires lourds				
Moyens antipollution perfectionnés	2,8	0,06	0,19	4,33
Moyens antipollution d'efficacité moyenne	2,8	0,07	0,23	5,24
Absence de moyens antipollution	2,2	0,10	0,25	5,70

combustion industriels, commerciaux et résidentiels ainsi que les centrales d'électricité. Les coefficients d'émission ont été tirés de l'EPA (EPA, 1985) et ils figurent au tableau 20. On a estimé que les émissions de ce secteur totalisaient 9 kt, et que 2,5 kt étaient imputables à la combustion du bois.

Bois de chauffage. Pour l'utilisation résidentielle du bois de chauffage, une ventilation est tirée d'un ouvrage cité dans les références (Roche et Associés, 1983), qui donne le pourcentage de bois brûlé dans les quatre principaux types de dispositifs de combustion les plus répandus au Québec.

Tableau 17 Répartition des véhicules dotés de catalyseurs au Canada (1990)

Province	Catalyseur trifonctionnel perfectionné	Catalyseur trifonctionnel primitif	Catalyseur d'oxydation	Absence de catalyseur
Terre-Neuve	0,446	0,049	0,370	0,135
Nouvelle-Écosse	0,422	0,047	0,387	0,144
Nouveau-Brunswick	0,424	0,044	0,394	0,138
Québec	0,474	0,053	0,354	0,119
Ontario	0,426	0,047	0,398	0,129
Manitoba	0,303	0,034	0,457	0,206
Saskatchewan	0,323	0,036	0,452	0,189
Alberta	0,309	0,034	0,456	0,202
Colombie-Britannique	0,266	0,029	0,423	0,281
Canada	**0,394**	**0,044**	**0,401**	**0,161**

Tableau 18 Exemple de calcul des émissions de méthane des automobiles à essence

Automobiles à essence	
Consommation d'essence :	20,72 GL
Catalyseur trifonctionnel perfectionné	$15{,}54 \times 10^9$ kg $\times$ 0,394 $\times$ 0,32 g/kg = $1{,}96 \times 10^9$ g de CH_4
Catalyseur trifonctionnel ordinaire	$15{,}54 \times 10^9$ kg $\times$ 0,044 $\times$ 0,50 g/kg = $0{,}34 \times 10^9$ g de CH_4
Catalyseur d'oxydation	$15{,}54 \times 10^9$ kg $\times$ 0,401 $\times$ 0,72 g/kg = $4{,}49 \times 10^9$ g de CH_4
Absence de catalyseur	$15{,}54 \times 10^9$ kg $\times$ 0,161 $\times$ 1,38 g/kg = $3{,}45 \times 10^9$ g de CH_4
Total partiel	10,24 kt de CH_4

Tableau 19 Coefficients d'émission des autres moyens de transport

Fer	(Gazole)	5,7 kg/TJ
Hors-route	(Essence)	4,1 kg/TJ
Mer	(Gazole)	5,7 kg/TJ
Air	(Essence d'aviation)	60,0 kg/TJ
Carburéacteur		2,0 kg/TJ

[a] (Source : EPA, 1985; OCDE, 1991)

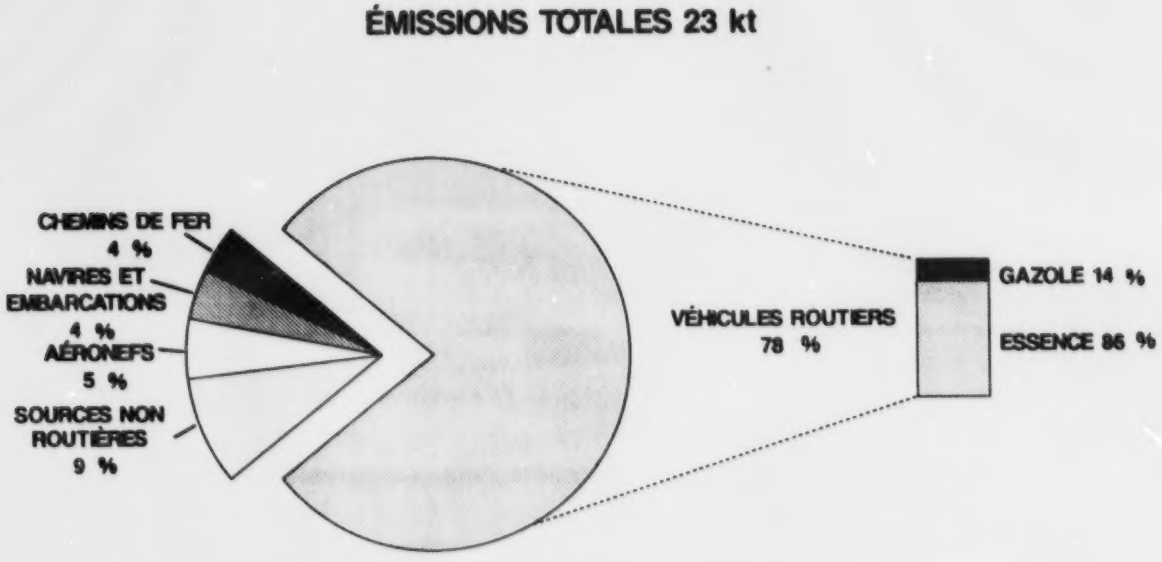


Figure 5 **Répartition des émissions de méthane entre les divers moyens de transport (1990)**

Les coefficients d'émission proviennent de l'EPA (EPA, 1985), tandis que la consommation du bois est tirée d'une étude de l'utilisation du bois de chauffage domestique (EMR, 1984) (*cf.* tableau 21)

L'industrie récupère également l'énergie des déchets de bois (Statistique Canada, 1991a). En 1990, 5 500 kt de déchets ligneux ont ainsi été brûlées et, d'après le coefficient d'émission de 0,15 g par kilogramme, les émissions estimatives de CH_4 se sont chiffrées à 0,8 kt.

4.1.5 Incinération

Les méthodes d'incinération en usage au Canada sont décrites dans la subdivision 3.2.5. Les coefficients d'émission de l'incinération des déchets ligneux et des ordures ménagères sont tirés de l'EPA (EPA, 1985) (*cf.* tableau 20) et ils ont servi à estimer les émissions de CH_4, qui totalisent 1 kt en 1990.

4.1.6 Décharges municipales

Comme il en a été question à la subdivision 3.2.6, les gaz libérés par les lieux d'enfouissement, CH_4 et CO_2 surtout, proviennent de la décomposition anaérobie des déchets organiques biodégradables. Dans une décharge donnée, un certain nombre de facteurs locaux concourent à déterminer la quantité de CH_4 qui sera dégagée.

Estimations des émissions. Les émissions de CH_4 provenant des décharges canadiennes ont été estimées à l'aide du modèle de production du CH_4 de l'EPA (Scholl Canyon), ainsi qu'à l'aide des données sur la quantité de déchets mis en décharge chaque année dans les lieux d'enfouissement du Canada au cours des 50 dernières années (Levelton and Associates, 1991).

Au Canada, on compte 9 987 décharges identifiées. Afin d'en estimer les émissions du CH_4, il faut des renseignements précis sur

Tableau 20 Coefficients d'émission du méthane dans les sources fixes

Source	Contenu en énergie brute	Coefficients d'émission	
	($TJ/10^6 m^3$)	($kg/10^6 m^3$)	(kg/TJ)
Gaz naturel	37,78		
Chaudières de centrales d'électricité		4,80	0,13
Chaudières industrielles		48,00	1,27
Foyers résidentiels et commerciaux		43,00	1,14
	($TJ/10^3 m^3$)	($kg/10^3 L$)	(kg/TJ)
Mazout résiduel	41,73		
Chaudières de centrales d'électricité		0,03	0,72
Chaudières industrielles		0,12	2,88
Chaudières commerciales		0,06	1,37
Fuel distillé	38,68		
Chaudières de centrales d'électricité		0,006	0,16
Chaudières industrielles		0,006	0,16
Chaudières commerciales		0,026	0,67
Chaudières résidentielles		0,214	5,53
Gaz de pétrole liquéfiés	25,53		
Chaudières industrielles		0,03	1,18
Chaudières et appareils de chauffage domestique		0,03	1,18
	(TJ/kt)	(g/kg)	(kg/TJ)
Bois	18,00		
Bois de chauffage		(0,15-0,5)	(0,01-0,03)
Déchets de bois		0,15	77,00
Incinération municipale	10,60	0,23	0,02
Charbon	(14,31-29,12)	0,015	(1,05-0,52)

Tableau 21 Émissions de méthane attribuables à la combustion du bois de chauffage

Dispositifs	Consommation de combustible (kt)	Coefficient d'émission du CH_4 (g/kg)	Émissions (t)
Poêle classique	0,243 × 11 400	0,20	555
Poêle à combustion lente	0,118 × 11 400	0,50	672
Foyer	0,475 × 11 400	0,01	54
Générateur	0,164 × 11 400	0,15	281
Total			**1 562**

les emplacements encore utilisés et ceux qui ont cessé de l'être, notamment la date de mise en exploitation de la décharge, la date de fermeture, la quantité de déchets solides urbains éliminée chaque année, la quantité totale de ces déchets sur place et la quantité de CH_4 captée si la décharge est équipée d'un système de captage des gaz.

Dans beaucoup de cas, on ne possédait pas ces renseignements. Pour en arriver à une estimation raisonnable des émissions, on a procédé comme suit :

1) On a obtenu de Statistique Canada la population (P) des provinces et des territoires pour la période de 1941 à 1990.

2) On a calculé, à partir de publications, la quantité de déchets solides urbains éliminée par habitant.

3) On a obtenu, auprès des municipalités qui pratiquent l'incinération, la quantité ainsi éliminée de déchets solides urbains durant la même période.

4) On a recueilli, auprès des responsables des principales décharges municipales, les dates d'ouverture et de fermeture, la quantité éliminée chaque année, la population servie et le volume de gaz captés.

(5) On a utilisé les données climatologiques disponibles sur chaque lieu d'enfouissement, y compris la température journalière moyenne et les précipitations annuelles afin d'estimer la valeur de la constante *k* de vitesse cinétique du modèle Scholl Canyon.

En 1990, la production de déchets urbains solides a été estimée à 1,75 kg par habitant et par jour, tandis que le taux moyen d'humidité de ces déchets a été fixé à 24,4 %, ce qui est la limite inférieure qui autorise la biodégradation anaérobie.

Le modèle Scholl Canyon exige deux paramètres d'entrée : L_0, la capacité de production de CH_4 des déchets, et *k*, la constante de vitesse cinétique. Plus les déchets renferment de cellulose, plus la valeur de L_0 est élevée. Outre ces deux paramètres, le calcul des émissions de CH_4 exige des renseignements sur la composition chimique des déchets, les antécédents de l'élimination de ces derniers et l'efficacité des dispositifs de captage des gaz.

Les valeurs de L_0 données dans un ouvrage cité dans les références (McGuinn, 1988) vont de 60 à 270 m^3 de CH_4 par million de grammes de déchets. La valeur implicite de L_0 utilisée en l'occurrence est de 232 m^3 de CH_4 par tonne. La constante de vitesse *k* de la production de CH_4 représente la vitesse

d'ordre un à laquelle la production de gaz ralentit dès la mise en décharge. Plus *k* est élevé, plus la production du CH_4 diminue rapidement dans le temps. La valeur de *k* est déterminée surtout par quatre grands facteurs : l'humidité des déchets, l'assimilabilité des éléments nutritifs par les bactéries méthanogènes, le pH et la température. La gamme des valeurs signalées pour capacité de production des gaz des déchets est étendue (*cf.* tableau 22). Ordinairement, les gaz de lieux d'enfouissement sont composés de 50 à 60 % en volume de CH_4. Pour les estimations, on a posé un taux de 50 % de CH_4 et de 50 % de CO_2.

Les valeurs *k* de lieux spécifiques d'enfouissement ont été déterminées après avoir pris en considération des précipitations annuelles moyennes et la température journalière moyenne.

En 1990, les décharges ont libéré dans l'atmosphère 2 106,9 × 10^6 m^3 de CH_4 (1 405 kt). Ce chiffre ne comprend pas les 205 kt de méthane qui ont été captés. Cette estimation est environ 22 % inférieure à celle utilisant la méthodologie simple exposée par Bingemer et Crutzen (Bingemer et Crutzen, 1987). On peut en arriver à un coefficient brut d'émission du CH_4 (de 65,96 kg par tonne de déchets urbains solides) d'après les émissions calculées par le modèle Scholl Canyon et la quantité de déchets urbains produite (21,3 Mt).

Le tableau 23 résume les estimations des émissions de CH_4 au Canada, y compris les quantités de gaz captés (Levelton and Associates, 1991). Faute de données suffisantes, on n'a pas estimé les émissions de CH_4 des décharges de déchets ligneux ou de déchets de la fabrication des pâtes à papier.

4.1.7 Animaux domestiques

La fermentation microbienne anaérobie des glucides dans l'appareil digestif des animaux libère du CH_4. Ce dernier représente une perte d'énergie pour l'animal. Les mécanismes de la production du CH_4 dans le rumen ont été étudiés en long et en large (Baldwin et Allison, 1983); toutefois, on dispose de très peu de données expérimentales sur les émissions de ce gaz par le bétail.

L'intervalle des vitesses de production du CH_4 par les animaux est très large et il dépend (chez les bovins de race laitière) du régime alimentaire, du poids vif métabolique et de la production laitière (Kirchgessner, Muller et Wendish, 1991). Comme la vitesse de production dépend d'un nombre aussi grand de variables, y compris l'absorption d'énergie, l'écologie de la flore intestinale et les dépenses d'énergie de l'animal, et comme elle subit également l'influence de facteurs tels que la quantité et la qualité de la nourriture ingérée, le poids de l'animal, l'âge et l'activité de ce dernier, les émissions de CH_4 par le bétail doivent être considérées comme préliminaires (*cf.* tableau 24).

Les émissions ont été estimées d'après la taille du cheptel ainsi que la quantité et la qualité des aliments du bétail disponibles au Canada. Les coefficients d'émission utilisés sont fondés sur plusieurs études (Crutzen, Aselmann et Seiler, 1986; Kirchgessner, Muller et Wendish, 1991; Blaxter et Clapperton, 1965) compilées dans un ouvrage (Kinsman, 1992), et ils se trouvent dans la partie médiane des intervalles de production signalés dans les publications. Crutzen *et al.* (Crutzen, Aselmann et Seiler, 1986) estiment que de 5 à 9 % de l'absorption d'énergie brute par les ruminants est gaspillée en production de CH_4. Pour déterminer les coefficients d'émission, on a posé qu'un certain pourcentage de l'énergie digestible, c'est-à-dire la différence entre l'énergie brute assimilée et l'énergie qui reste dans les excréments, était perdue sous forme de CH_4. Chez la volaille, les fientes et l'urine sont excrétées ensemble, de sorte que les besoins énergétiques de la volaille sont normalement

Tableau 22 Valeurs signalées de la capacité de production de méthane des déchets

Méthode d'estimation[a]	L_0 estimatif (m^3 de CH_4/t)	Hypothèses posées
1. Équation stoechiométrique équilibrée	230 à 270	Composition chimique du mélange de déchets ($C_{99}H_{149}O_{59}N$), du papier ($C_{203}H_{334}O_{138}N$) et des déchets d'aliments ($C_{16}H_{27}O_8$)
2. Biodégradabilité des matières	6 à 230 47(moyenne)	1,5 kg et 351 L de DCO biodégradable par kilogramme de matières volatiles
3. Biodégradabilité des matières	47(moyenne)	Les déchets mélangés humides sont constitués de 70 % de matières organiques décomposables : 50 % de ces dernières sont volatiles; il y a 375 L de gaz par kilogramme de matières volatiles; 50 % de ce gaz est du CH_4.
4. Biodégradabilité des matières	120	Les déchets mélangés humides sont constitués de 70 % de matières organiques décomposables : 70 % de ces dernières sont transformées en gaz; il y a 690 L de gaz par kilogramme de matières organiques décomposables sèches; taux d'humidité de 25 %; 50 % de ce gaz est du CH_4.
5. Teneur en matières organiques totales	190 à 270	1 mole de C organique donne 1 mole de gaz; 50 % des gaz produits est constitué de CH_4; la totalité du C organique est transformée en gaz.
6. Équation stoechiométrique	210	Pour l'ensemble des déchets urbains solides
7. Équation stoechiométrique	229	Pour l'ensemble des déchets urbains solides
8. Biodégradabilité pondérée	170	—
9. Biodégradabilité pondérée	91	—
10. Biodégradabilité pondérée	119	—
11. Biodégradabilité pondérée	59	—

(Source : McGuinn, 1988)

[a] Les méthodes 1 à 5 sont fondées sur la quantité (en Mg) de déchets humides, tandis que les méthodes 6 à 11 se fondent sur la quantité (en Mg) de déchets secs. Les résultats des méthodes 1 à 5 n'ont pas été ramenés au poids sec des déchets parce que le taux d'humidité de ces derniers n'était pas connu.

Tableau 23 Émissions de méthane dans les lieux d'enfouissement de chaque province (1990)

Province ou territoire	Quantité produite (t)	Quantité récupérée (t)	Émissions (t)	Émissions (Mm^3)
Terre-Neuve	27 105	0	27 105	40,6
Nouvelle-Écosse	42 186	0	42 186	63,2
Île-du-Prince-Édouard	5 267	0	5 267	7,9
Nouveau-Brunswick	34 954	0	34 954	52,4
Québec	324 957	68 590	256 367	384,3
Ontario	786 465	112 018	674 447	1 010,9
Manitoba	32 726	1 649	31 077	46,6
Saskatchewan	31 368	0	31 368	47,0
Alberta	74 249	1 086	73 163	109,7
Colombie-Britannique	250 631	22 005	228 625	342,7
Territoires du Nord-Ouest	655	0	655	1,0
Yukon	331	0	331	0,5
Canada	**1 610 891**	**205 348**	**1 405 543**	**2 106,8**

exprimés par l'énergie métabolisée (EM) et que la production de CH_4 est un pourcentage de l'EM. Les émissions de méthane par type d'animal sont montrées à la figure 6.

4.1.8 Fumier

La méthode d'estimation des émissions de CH_4 des fumiers a été prise chez Casada et Safley (Casada et Safley, Jr., 1990). En élaborant leurs estimations pour le Canada, ces auteurs se sont appuyés sur des renseignements fournis par les ministères de l'Agriculture des provinces sur le type et le nombre de systèmes de gestion des déchets en usage.

Le potentiel de production de CH_4 à partir des déjections animales est directement corrélé à la quantité de matières volatiles présentes dans ces déjections. Afin de quantifier le coefficient de production du CH_4 des déjections, on doit d'abord déterminer l'effet de l'animal sur cette production. La masse typique de l'animal vivant, la quantité totale produite de fumier, la quantité totale de matières solides et la quantité totale de matières volatiles influent toutes sur la production de CH_4.

La quantité de CH_4 susceptible d'être produite par les matières volatiles présentes dans les déjections de chaque type d'animal a été déterminée à partir de divers résultats publiés. Pour les animaux sur lesquels on ne disposait d'aucun renseignement publié, les estimations découlent de similitudes posées par hypothèse avec d'autres animaux. Les valeurs convenables du coefficient possible de production du CH_4 ont été choisies d'après le régime ordinaire de chaque type d'animal.

À la lumière des renseignements fournis sur l'ensemble du bétail et de la volaille au Canada ainsi que sur les types de systèmes de gestion des déjections en usage, les émissions estimatives de CH_4 totaliseraient 332 kt en 1990 (Casada et Safley, Jr., 1990). Un sommaire des coefficients d'émission utilisés pour chaque type d'animal et des émissions auxquels ils correspondent est donné au tableau 25.

Tableau 24 Production de méthane par les animaux domestiques (1990)

Animal	Population (milliers)	Production de CH_4 ($kg \cdot an^{-1} \cdot animal$)	Émissions totales (kt)
Chevaux	340	18,00	6
Mulets	4	10,00	<1
Bovins			
Taureaux	237	120,00	28
Vaches laitières	1 379	120,00	165
Vaches de boucherie	3 590	48,00	172
Génisses de races laitières	644	72,00	46
Génisses de races bouchères	741	36,00	27
Génisses élevées pour la boucherie	627	36,00	23
Bouvillons	1 213	48,00	58
Veaux	3 854	24,00	93
Porcins			
Verrats	65	5,00	<1
Truies	1 045	5,00	5
Porcs (< 20 kg)	3 238	1,00	3
Porcs (de 20 à 60 kg)	3 230	2,00	7
Porcs (> 60 kg)	2 955	3,00	9
Moutons	399	10,00	4
Agneaux	360	6,00	2
Chèvres	64	5,00	<1
Volaille			
Poulets	61 642	0,00	<1
Poules	21 336	0,02	<1
Dindons	7 372	0,01	<1
Humains	26 000	0,05	1
Total			**655**

4.1.9 Brûlage dirigé

Les émissions de CH_4 dont il est question ici sont dégagées pendant le brûlage dirigé ou le brûlage des rémanents. Elles sont fondées sur la moyenne décennale (de 1980 à 1989) des incendies, d'après les renseignements fournis par Forêts Canada (Stocks, 1990b; Radke, Hegg, Hobbs, Nance, Lyons, Laursen, Weiss, Riggan et Ward, 1991; Taylor, 1992). Le coefficient d'émission du CH_4 retenu est la médiane des valeurs mesurées pour l'intervalle de 3,3 à 6,6 g par kilogramme, c'est-à-dire 5 g par kilogramme de combustible consumé. La quantité de combustible consumé est montrée au tableau 26.

4.2 Sources naturelles

4.2.1 Terres humides

La méthode qui a servi à estimer les émissions de CH_4 des terres humides se fonde sur les travaux de Matthews et de Fung (Matthews et Fung, 1987). Les émissions ont été calculées à partir des flux de CH_4 dans les principaux groupes de terres humides ainsi que d'hypothèses simples concernant la durée de la saison de production du CH_4. À cause

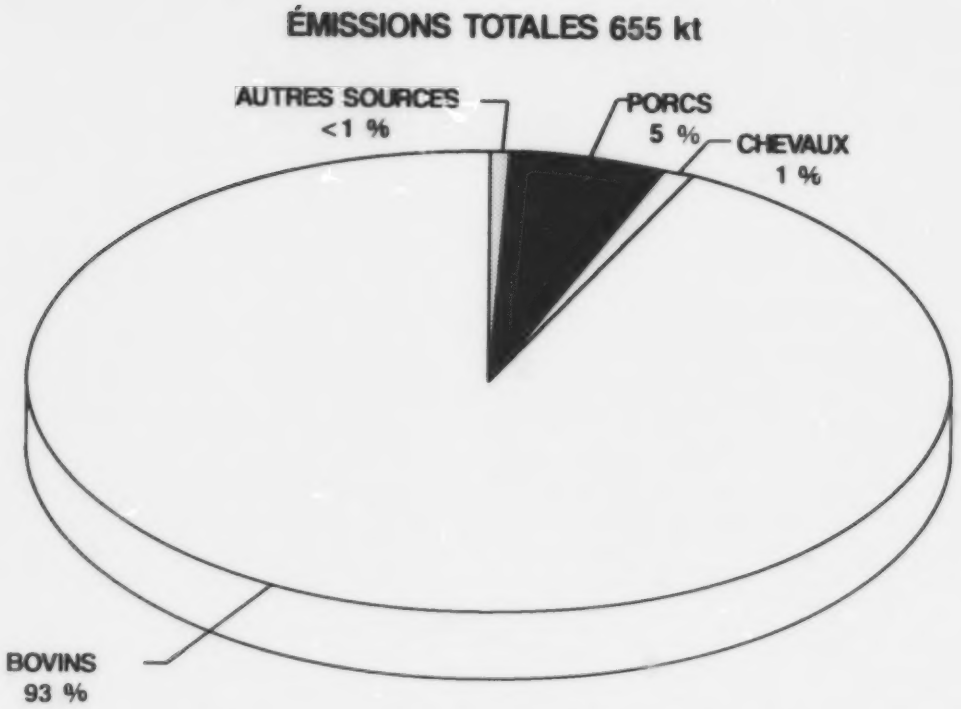


Figure 6 **Répartition des émissions de méthane selon le type d'animal**

Tableau 25 **Émissions de méthane dues aux déjections animales**

Déjections animales/ fumier	Cheptel canadien (milliers de têtes)	Production de matières volatiles (10^3 t/a)	Coefficients de transformation en méthane[a]	Émissions (kt/a)
Chevaux	340			0,00
Mulets	4			0,00
Bovins de races laitières	2 023	2 260,50	0,019	86,89
Bovins de boucherie	10 262	1 103,80	0,011	124,60
Porcs reproducteurs	2 000	561,50	0,043	48,29
Porcs commerciaux	8 533	140,30	0,044	52,68
Brebis et agneaux	759	338,80	0,019	4,89
Caprins	64			0,00
Volaille				
Poulets	61 642	5,60	0,024	8,15
Poules	21 336	7,90	0,018	3,03
Dindons	7 372	22,60	0,019	3,17
Émissions totales dues au fumier				**331,70[b]**

[a] Le coefficient de conversion du méthane en kt de CH4 par millier de têtes et par kt de matières volatiles.
[b] L'estimation pour 1990 se chiffre à 345 kt.

de la forte incertitude qui entache la valeur des flux ainsi que les renseignements sur les terres humides, les flux calculés par Matthews et Fung ont donc été réduits de 25 % pour le Canada (Fung, John, Lerner, Matthews, Prather, Steele et Fraser, 1991). En outre, selon des études plus récentes, les émissions du CH_4 par les terres humides du nord seraient considérablement plus faibles que ne le dit Matthews et Fung, notamment pour les tourbières oligotrophes (Moore et Knowles, 1990; Vitt, Bayley, Jin, Halsey, Parker et Craik, 1990; Naiman, Manning et Johnston, 1991; Price, 1991). Il pourra être nécessaire de modifier les estimations nationales des émissions reproduites dans le rapport quand les coefficients et les classements de Price seront évalués.

Les flux du CH_4 ont été calculés pour plusieurs grands écosystèmes humides (*cf.* tableau 27). Sous les latitudes nordiques, c'est-à-dire au-dessus du 60° de latitude nord, on a posé que la durée de la saison de croissance était de 100 jours, tandis qu'aux latitudes entre 30 et 60° de latitude nord, elle était de 150 jours. Les renseignements sur la superficie et le type des terres humides ont été tirés de la publication «Terres humides du Canada» (Environnement Canada, 1988). En 1990, les émissions estimatives de méthane ont totalisé 24 Mt.

4.2.2 Incendies de forêt

Les émissions de CH_4 qui accompagnent les incendies de forêt au Canada ont été estimées à l'aide de la méthode qui a servi à estimer les émissions de ce gaz qui accompagnent le brûlage dirigé (Stocks, 1990) ainsi qu'à l'aide d'un coefficient d'émission de 5 g par kilogramme de combustible consumé (Radke, Hegg, Hobbs, Nance, Lyons Laursen, Weiss, Riggan et Ward, 1991). La quantité de combustible est déduite de la superficie brûlée dans chaque écosystème au cours des 10 dernières années ainsi que de la masse de combustible brûlé par unité de surface dans chaque région écoclimatologique (*cf.* tableau 28).

4.2.3 Faune

Les besoins énergétiques de la faune ne sont pas aussi bien connus que ceux des animaux domestiques. Les coefficients d'émission ont été calculés d'après l'hypothèse que la production de CH_4 chez la faune et chez les animaux domestiques est semblable, c'est-à-dire 9 % de l'énergie digestible ingérée (Crutzen, Aselman et Seiler, 1986; Hicks, 1991). Les émissions ont été estimées pour les animaux dont on pouvait connaître assez facilement la population estimative.

D'après l'intervalle des pourcentages de l'énergie digestible ingérée, qui va de 6,7 à 14,3 %, les coefficients annuels suivants de production du CH_4 par tête ont été calculés : cerf (5 kg); mouflon (6 kg); caribou (9 kg); wapiti (14 kg) et orignal (17 kg) (Hicks, 1991). Les émissions de CH_4 par les animaux sauvages ont été estimées à 100 kt.

Tableau 26 Combustibles consumés au cours de brûlages dirigés

Province	Type	Superficie brûlée (ha)	Combustibles consumés (kg/m^2)	Émissions de CH_4 (kt)
Colombie-Britannique	Sylviculture	53 992	8,0	21
	Habitat faunique et parcours	44 205	6,4	14
Ontario	Conversion des stations	3 384	8,1	1,4
	Récolte	4 308	5,9	1,2
Total		**105 889**		**37,6**

Tableau 27 Flux de méthane des écosystèmes à terres humides

	Écosystème	Flux ($g\ de\ CH_4 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)
Fung, John, Lerner Matthews, Prather, Steele et Fraser (1991)	1. Marais boisés et non boisés	22,5
	2. Marécages boisés	7,5
	3. Marécages non boisés	13,5
	4. Formations alluviales	3,0
Price (1991)	1. Retenues de barrages de castors	15,0
	2. Marécages	20,0
	3. Tourbières minéralotrophes et marécages	5,0
	4. Marais	0,5

Tableau 28 Émissions de méthane dues aux incendies de forêt

Région écoclimatologique	Superficie brûlée (ha)	Quantité de combustible consumée (kg/m^2)	Émissions de CH_4 (kt)
Boréale	1 760 000	2,5	220
Subarctique	560 000	1,8	50
Cordillères	150 000	7,4	57
Prairie	9 000	0,3	-
Cordillères de l'intérieur	7 000	3,2	-
Tempérée fraîche	5 000	2,0	-
Cordillères subarctiques	3 000	2,0	-
Cordillères du Pacifique	2 000	14,2	-
Total	**2 496 000**		**327**

Section 5

Émissions d'oxyde de diazote

Les estimations portent sur les sources anthropiques et naturelles. Le tableau 29 en présente un résumé. Chacune des sources importantes et la méthode utilisée pour en estimer les émissions sont décrites ci-dessous. Toutes les estimations données en tant que N ne se rapportent qu'à l'azote constitutif de la molécule de N_2O. Les estimations données dans les tableaux sommaires des émissions se rapportent à la quantité moléculaire totale de N_2O.

5.1 Sources anthropiques

5.1.1 Sources de combustion

Le N_2O est produit directement par la combustion des combustibles fossiles, bien que l'on ne comprenne pas complètement le mécanisme de sa formation. Selon des études récentes (Muzio et Kramlich, 1988; Linak, McSorley et Hall, 1989), les analyses, faites avant 1988, des échantillons prélevés dans les foyers fixes de combustion sont imprécises ou elles surestiment considérablement les émissions de N_2O si les échantillons entreposés n'ont pas été séchés ni débarrassés de leur SO_2 ou, encore, si les dosages du N_2O n'ont pas été effectués immédiatement. Ces constatations récentes ébranlent certaines conclusions qui portent à corréler les émissions de N_2O et l'azote présent dans les combustibles ou les émissions de N_2O et les NO_x (Hao, Wotsy, McElroy, Beer et Togan, 1987). Des mesures ultérieures ont montré que les émissions des foyers fixes sont beaucoup plus faibles qu'on ne le pensait.

La formation de N_2O dans les moteurs à combustion interne est également mal comprise. Les gaz d'échappement non épurés renferment très peu de N_2O. On a montré que le N_2O représente moins de 1 % (entre 0,4 et 0,75 %) de toutes les émissions de NO_x des moteurs à essence ou des moteurs diesel qui ne sont pas épurées au moyen d'un convertisseur catalytique (Prigent et De Soete, 1989). Toutefois, du N_2O est produit par la réaction de NO et de NH_3 sur le platine de ces convertisseurs (Otto, Shelef et Kummer, 1970). La réaction dépend beaucoup de la température. On a observé que les nouveaux catalyseurs trifonctionnels au platine (Pt) et au rhodium (Rh), qui servent à abaisser les émissions de NO_x, pourraient accroître la concentration de N_2O dans les gaz d'échappement, surtout durant l'allumage du catalyseur, mais qu'ils libèrent très peu de ce gaz aux températures médianes (400 à 500 °C) (Prigent et De Soete, 1989).

Plusieurs études ont porté sur le N_2O des gaz d'échappement des automobiles dotées ou non d'un convertisseur catalytique (Dasch, 1992; Urban et Garbe, 1980; Prigent et De Soete, 1989; De Soete, 1989; Prigent, De Soete et Doziere, 1991). Elles arrivent à des conclusions comparables pour les véhicules dotés d'un catalyseur d'oxydation ou dépourvus de catalyseur, mais non pour les véhicules dotés depuis un certain temps d'un convertisseur trifonctionnel. Seules quelques études cohérentes et systématiques ont été réalisées sur le vieillissement des catalyseurs (De Soete, 1989; Prigent, De Soete et Doziere, 1991). Selon ces dernières, on observe le maximum de formation du N_2O vers la température d'allumage du catalyseur ainsi qu'une multiplication de l'ordre de 2 à 4,5 des émissions de N_2O après le vieillissement du catalyseur. L'augmentation des émissions est due à la dérive de la température d'allumage, du fait du vieillissement. En conséquence, le catalyseur finit par fonctionner dans la gamme optimale de températures où se forme le N_2O.

Tableau 29 Sommaire des émissions d'oxyde de diazote au Canada (1990)

Sources	Émissions	
	kt de N_2O	Pourcentage du total
Anthropiques		
Sources fixes de combustion		
Gaz naturel	1,55	1,69
Charbon	2,46	2,67
Huile lourde et légère	2,22	2,41
Bois	3,90	4,24
Sources mobiles		
Essence à moteur	29,40	31,97
Gazole	6,97	7,58
Huile lourde	0,65	0,71
Essence d'aviation	1,27	1,38
Fabrication de l'acide nitrique	1,02	1,11
Fabrication de l'acide adipique	30,00	32,62
Emploi des engrais	11,00	11,96
Divers	1,53	1,66
Total des émissions anthropiques	**91,97**	**100,00**
Émissions naturelles		
Sols	1 150,29	
Étendues d'eau	2,2	
Total des sources naturelles	**1 152,49**	

Bref, les études des émissions imputables aux combustibles fossiles qui sont antérieures à juin 1988 semblent erronées, pour deux raisons surtout : (1) les émissions des foyers fixes ont été surestimées en raison de réactions parasites qui surviennent dans les échantillons ponctuels renfermant du NO et du SO_2, dont l'analyse ne se fait pas immédiatement; (2) les émissions de N_2O des véhicules automobiles ont été sous-estimées parce que l'on n'a pas tenu compte du vieillissement des convertisseurs catalytiques.

Les coefficients d'émission ont été calculés pour les foyers fixes et pour les sources mobiles à partir de mesures effectuées en Europe et au Canada (De Soete, 1989; Prigent et De Soete, 1989; Prigent, De Soete et Doziere, 1991; Association canadienne de l'électricité et CANMET, 1990; États-Unis, EPA, 1989). Ils sont présentés aux tableaux 30 et 31.

Pour conserver un système cohérent d'unités pour toutes les estimations des émissions, le

Tableau 30 Intervalle des coefficients d'émission de l'oxyde de diazote

Foyers fixes classiques	
Charbon	les moyennes se situent entre 2 et 10 ppm.
Huile lourde	les moyennes se situent entre 1 et 10 ppm.
Gaz naturel	les moyennes se situent entre 1 et 3 ppm.
Sources mobiles	
Essence à moteur	
Pas de catalyseur	les moyennes se situent entre 3 et 40 ppm.
Catalyseurs neufs	les moyennes sont de deux à cinq fois les moyennes des émissions sans catalyseur.
Vieux catalyseurs	les moyennes sont d'environ sept fois les moyennes des émissions sans catalyseur.
Gazole	les moyennes se situent entre 3 et 40 ppm.

présent rapport utilise les valeurs de De Soete concernant le volume des gaz de combustion (dans des conditions stoechiométriques) du gaz naturel, de l'huile lourde et du charbon. En outre, les masses volumiques données dans le tableau 32 servent à convertir les unités de volume en unités de masse.

Combustion du gaz naturel. Les émissions des foyers fixes ont été estimées d'une façon semblable. Voici un exemple des calculs des émissions imputables au gaz naturel et, par voie de conséquence, d'un coefficient d'émission.

Concentration moyenne de N_2O dans les gaz de combustion : 1,25 ppm. D'après les équations stoechiométriques, la combustion de 1 kg de gaz naturel libère 10,91 m^3 de gaz de combustion et, à la température et à la pression normales (TPN), c'est-à-dire à 1 atmosphère et à 60 °F, le volume molaire est de 23,7 m^3. Il s'ensuit que la concentration de N_2O dans les gaz de combustion équivaut à $1,25 \times 10^{-6}$ (44 kg · mol/23,7 m^3), soit $2,32 \times 10^3$ µg/m^3. En tant que N_2, cela équivaut à $28/44 \times 2,32 \times 10^3$ µg/m^3, soit 1 477 µg/m^3 de gaz de combustion. Si, par hypothèse, on suppose 10 % d'air excédentaire, le volume de gaz de combustion sera de 12 m^3 par kilogramme de combustible.

En 1990, la consommation de gaz naturel et de gaz distillé au Canada s'est élevée à 74,86 TL, soit 58,4 Mt. Cette consommation s'est traduite par des émissions qui ont totalisé 1,04 kt ($58,4 \times 10^9$ kg $\times$ 12 m^3/kg $\times$ 1 477 µg/m^3).

Le coefficient moyen d'émission pour le gaz naturel serait donc de 0,0178 kg de N par tonne ou 0,028 kg de N_2O par tonne.

En suivant le même raisonnement, on a calculé les coefficients d'émission imputables au charbon, à l'huile, à l'essence et au gazole (*cf.* tableau 31).

À partir de la ventilation de l'emploi des techniques antipollution, donnée au tableau 17, ainsi que de la consommation de carburant, qui ont servi à estimer les émissions de CO_2 et de CH_4, il a été possible d'estimer les émissions de N_2O des véhicules routiers et des véhicules hors-route. Les

Tableau 31 Coefficients d'émission de l'oxyde de diazote imputables aux combustibles et aux carburants fossiles

Combustible ou carburant	Coefficient d'émission (kg de N_2O/t)	Consommation (Mt)	Émissions (kt)
Foyers fixes			
Charbon (combustion classique)	0,05	49,29	2,46
Charbon (lit fluidisé)	2,11	0,00	0,00
Gaz naturel et gaz distillé	0,03	58,40	1,75
Huile légère et huile lourde	0,14	15,90	2,23
Sources mobiles			
Essence à moteur			
Pas de catalyseur	0,31	6,16	1,91
Catalyseur d'oxydation	0,60	6,13	3,68
Catalyseur trifonctionnel	0,60	6,63	3,98
Vieux catalyseur trifonctionnel	2,20	9,01	19,83
Gazole	0,46	15,15	6,97
Huile lourde	0,46	1,41	0,65
Essences d'aviation	0,31	4,10	1,27
Total, combustibles fossiles			**44,73**

Tableau 32 Masses volumiques utiles à la conversion des volumes en masses

Combustible ou carburant	Volume stoechiométrique de gaz de combustion (Nm^3/kg)	Masse volumique (kg/Nm^3)	ppm
Gaz naturel	10,91	0,78	1 à 1,5
Charbon	8,54	—	3,7 à 7,8
Huile lourde	9,72	930	1 à 12
Essence à moteur	—	750	selon le dispositif antipollution
Gazole	—	870	3 à 40

résultats sont présentés au tableau S.1. Dans l'hypothèse d'une durée de vie utile de 10 ans, on peut affirmer que 90 % des catalyseurs trifonctionnels sont vieux (*cf.* tableau 33).

Il est clair qu'on a besoin davantage de mesures et de renseignements pour confirmer l'effet des catalyseurs sur les émissions et pour mieux définir la pénétration des techniques antipollution des véhicules automobiles.

Combustion du bois. L'estimation des émissions de N_2O imputables à l'emploi du bois de chauffage se fonde sur un coefficient d'émission de 0,16 g de N_2O par kilogramme (Rosland et Steen, 1990; Radke, Hegg, Hobbs, Nance, Lyons, Laursen, Weiss, Riggan et Ward, 1991).

L'industrie brûle chaque année environ 5 500 kt de déchets ligneux, tandis qu'il se consomme environ 11 400 kt de bois pour le chauffage résidentiel. Cette utilisation énergétique du bois se traduit par des émissions de N_2O que l'on estime en tout à 2,7 kt. À cela s'ajoute le brûlage dirigé responsable de l'émission de 1,2 kt de N_2O.

5.1.2 Fabrication de l'acide nitrique

L'acide nitrique (HNO_3) est un produit intermédiaire de la fabrication des engrais azotés. La quantité formée dépend de la composition des gaz, des conditions de réaction, de la conception des réacteurs et du type de catalyseur. En outre, les concentrations observées dans les gaz dégagés par la réaction dépendront du type d'usine et des dispositifs de captage des émissions.

Les émissions de N_2O ont été estimées uniquement à partir des renseignements fournis par l'industrie, qui, de son côté, se fonde sur les mesures et calculs propres à chaque entreprise (ICI, 1991; Norsk Hydro, 1991). L'intervalle signalé des émissions varie de 2 à 20 kg de N_2O par tonne de NH_3 utilisé dans la fabrication de l'acide nitrique, la médiane étant de 8,5 kg. Selon les analyses récentes, les émissions des usines canadiennes se trouvent à l'extrémité inférieure de cet intervalle (Collis, 1992a).

À partir d'un coefficient de 3,4 kg par tonne et d'une utilisation estimative de 300 kt de NH_3 (Corpus Information Services, 1990a), les émissions de N_2O au Canada dues à la fabrication de l'acide nitrique en 1990 sont estimées à 1 kt.

5.1.3 Fabrication de l'acide adipique

Thiemens et Trogler (Thiemens et Trogler, 1991) ont montré que la fabrication du nylon pouvait s'accompagner d'émissions considérables de N_2O : 0,303 kg de N_2O par kilogramme de produit est émis durant la fabrication de l'acide adipique.

En 1990, la production d'acide adipique s'est chiffrée à environ 100 kt (Corpus Information Services, 1991). On a donc estimé à 30 kt la quantité de N_2O émise dans cette industrie.

5.1.4 Utilisation des engrais

Dans des conditions aérobies ou anaérobies, le sol peut libérer du N_2O. La cause en est toujours l'oxydation de l'azote minéral. Dans les fumures azotées, tant organiques que minérales, la plus grande partie de l'azote s'oxyde en nitrate avant d'être assimilée par les végétaux. Cette oxydation porte le nom de nitrification.

Si les conditions deviennent anaérobies, c'est-à-dire lorsque le sol est gorgé d'eau ou mal drainé, les nitrates peuvent être réduits, par des bactéries anaérobies facultatives, en N_2O. Cette réduction peut se poursuivre jusqu'au stade N_2 avant que ce dernier ne s'échappe dans l'atmosphère. Cette réaction s'appelle dénitrification. La quantité de N_2O formée dépend d'un certain nombre de facteurs pédologiques tels que l'oxygénation, la teneur en eau, la température, la structure du sol, la teneur en matières organiques et la concentration de nitrates. La plupart des périodes d'échantillonnage qui ont permis de mesurer des émissions au Canada ont été inférieures à un an; l'estimation des émissions

totales annuelles risque donc de pécher par défaut. D'autre part, les émissions dues à l'application d'ammoniac sont probablement élevées, en partie à cause des doses généralement faibles de l'application de cet engrais au Canada. Davantage de travaux de recherche sont nécessaires afin d'améliorer les estimations (Institut canadien des engrais, 1992).

Le tableau 34 présente les pourcentages d'engrais azotés qui se dégagent sous forme de N_2O (Eichner, 1990). À partir de ces chiffres, l'Institut canadien des engrais a calculé l'intervalle des émissions de NO_2 (Collis, 1992b). La moyenne de ces estimations est montrée au tableau 35.

Les émissions totales de N_2O au Canada imputables aux engrais se situent dans la gamme de 3,3 à 27,8 kt, la moyenne étant d'environ 10,7 kt.

5.1.5 Sources diverses

Emploi des anesthésiques. Un coefficient d'émission de N_2O a été estimé pour les États-Unis, d'après les chiffres de la consommation des produits et la population. Par hypothèse, on pose que tout le N_2O anesthésiant finit par se retrouver dans l'atmosphère. À partir d'un coefficient d'émission de 57,8 g par habitant (Ortech, 1991) et d'une population estimative de 26 millions, les émissions au Canada se chiffreraient à 1,5 kt en 1990.

Agents propulseurs. Un coefficient d'émission a également été calculé pour cet usage. D'après la consommation aux États-Unis et la population de ce pays, le coefficient estimatif se chiffre à 3,03 g de N_2O par habitant. En appliquant ce coefficient à la population du Canada, on estime pour ce pays que les émissions ont totalisé 0,03 kt en 1990.

Lignes de transport de l'électricité sous haute tension. Aucune estimation de la formation de N_2O par l'effet couronne ne se trouve dans le présent rapport. Les données sur ce phénomène sont rares, et ce dernier a besoin d'être mieux étudié avant que l'on puisse faire une estimation.

5.2 Sources naturelles

Dernièrement, Environnement Canada a entrepris très peu de travaux pour évaluer les sources naturelles des émissions de N_2O. Un rapport préparé en 1981 sert de fondement aux estimations du présent rapport (Environnement Canada, 1981).

Les coefficients estimés devraient être considérés comme des ordres de grandeur uniquement. Le N_2O est dégagé par plusieurs sources, y compris les sols, les océans, les eaux douces, les incendies, la foudre et la végétation. On s'accorde généralement à dire que la production des sols et des eaux marines domine les sources planétaires. Les autres sources, la foudre particulièrement, sont considérablement plus modestes (Environnement Canada, 1981).

Tableau 33 Calcul des émissions d'oxyde de diazote imputables aux véhicules automobiles

Automobiles à essence		
Vieux catalyseurs trifonctionnels	$2{,}2\ g/kg \times 15{,}54 \times 10^6\ kg \times 0{,}394 =$	13,47 kt
Nouveaux catalyseurs trifonctionnels	$0{,}6\ g/kg \times 15{,}54 \times 10^6\ kg \times 0{,}040 =$	3,79 kt
Catalyseurs d'oxydation	$0{,}6\ g/kg \times 15{,}54 \times 10^6\ kg \times 0{,}401 =$	1,91 kt
Pas de catalyseur	$0{,}3\ g/kg \times 15{,}54 \times 10^6\ kg \times 0{,}161 =$	0,77 kt

Tableau 34 Pourcentage d'engrais azotés dégagé sous forme d'oxyde de diazote

Type d'engrais	Pourcentage d'engrais azotés dégagé sous forme de N_2O		
	Min.	Max.	Moyenne
Urée	0,07	0,18	0,11
Sulfate et phosphate d'ammonium	0,02	0,90	0,25
Nitrate d'ammonium	0,04	1,71	0,44
Ammoniac	0,86	6,84	2,70
Nitrate de calcium	0,001	0,50	0,07

On trouvera plus de renseignements sur les méthodes de calcul des flux et d'estimation des émissions dans ce rapport (Environnement Canada, 1981)

À la lumière des flux du tableau 36 et connaissant la superficie des milieux aquatiques et terrestres, les émissions estimatives de NO_2 en tant que N totalisent 732 kt quand elles sont d'origine terrestre et 1,4 kt quand elles sont d'origine marine (dans le tableau 29, les chiffres sont en kilotonnes de N_2O).

Tableau 35 **Pertes d'azote sous forme d'oxyde de diazote subies par les engrais azotés minéraux, dans les provinces du Canada (1989)**

Engrais	Taux de pertes (%)[a]	Prov. de l'Atlant. (t)	Qc (t)	Ont. (t)	Man. (t)	Sask. (t)	Alb. (t)	C.-B. (t)	Canada (t)	Canada (%)
Urée	0,11	5,5	50,7	89,6	75,7	127,1	144,4	20,7	513,7	(4,8)
Sulfate et phosphate d'ammonium	0,25	20,5	77,0	156,3	107,4	121,7	138,8	15,9	637,5	(6,0)
Nitrate d'ammonium	0,44	39,6	52,9	96,4	81,4	38,5	114,1	20,9	443,8	(4,2)
Ammoniac	2,70	-	70,8	696,8	2 461,8	1 936,9	3 612,3	277,0	9 055,6	(85,0)
Nitrate de calcium	0,07	-	1,3	-	-	-	-	-	1,3	(0,0)
Total		**65,6**	**253,7**	**1 039,1**	**2 726,3**	**2 224,2**	**4 009,6**	**334,5**	**10 651,9**	**(100,0)**

(Source : Institut canadien des engrais, 1992)
[a] D'après le tableau 34

Tableau 36 Flux annuels d'oxyde de diazote au Canada (kg de N/km^2)

Sources biotiques terrestres	N_2O
Sols	
Chernozems	107,4
Solonetz	44,9
Luvisols	27,2
Podzols	225,4
Brunisols	47,0
Régosols	6,7
Gleysols	26,3
Organiques	157,9
Terrains rocheux	5,0
Incendies de forêt et de broussailles	
Toundra	
Forêt boréale et terres nues	
Ontario, Québec, Maritimes	0,27
Prairies et Territoires	0,49
Forêt boréale	
Ontario, Québec, Maritimes	1,05
Prairies et Territoires	1,96
Forêt-parc à peupliers	0,98
Zone côtière et montagnes	0,49
Forêts de la région des Grands Lacs et forêts acadiennes	1,26
Prairies	0,02
Sources biotiques du milieu aquatique	
Milieu marin	
Arctique	29,00
Pacifique	101,00
Sud de l'Atlantique	84,00
Nord de l'Atlantique	59,00
Foudre	
Toundra	0,05
Forêt boréale et terres nues	0,19
Forêt boréale	0,39
Forêt-parc à peupliers	0,62
Forêts de la côte et des montagnes	0,27
Forêts de la région des Grands Lacs et forêts acadiennes	0,54
Prairies, agriculture	0,67

Section 6

Émissions halogénées

6.1 Les chlorofluorocarbures

Même si, habituellement, les chlorofluorocarbures (CFC) sont considérés collectivement, ces composés ou préparations possèdent une individualité : plusieurs sont produits industriellement, tandis que d'autres ont été mis au point expérimentalement. Leur désignation par un système de numérotation a été imaginée par la société DuPont pour les hydrofluorocarbures. Par exemple, lorsqu'on lit l'abréviation CFC-11 (qui représente le CCl_3F) de droite à gauche, le premier chiffre désigne le nombre d'atomes de fluor dans la molécule; le deuxième, le nombre d'atomes d'hydrogène plus un; le troisième, le nombre d'atomes de carbone moins un (le zéro n'est pas indiqué).

Les émissions de CFC ont été estimées pour l'année 1990 à partir de la méthode de Gamlen et Steed (Gamlen, Lane, Midgley et Steed, 1986). Les statistiques sur la consommation des CFC-11, -12 ainsi que, collectivement, des CFC-113 à -115 ont été obtenues de la Direction des produits chimiques commerciaux d'Environnement Canada et elles se fondent sur les données confidentielles fournies par l'industrie.

Afin de calculer le rythme général de dégagement des CFC, il faut estimer le temps pris pour que ces composés se dégagent par suite des divers usages auxquels ils sont soumis. À cette fin, la façon la plus efficace est de répartir les utilisations de chaque CFC en six catégories, qui réunissent chacune les emplois donnant lieu à des modes semblables de libération. Ces catégories comprennent : les aérosols; les systèmes hermétiques de réfrigération (longue durée de vie, environ 12 ans); les systèmes non hermétiques de réfrigération (courte durée de vie, environ 4 ans); les mousses à alvéoles fermées, dites également cellulaires; les mousses à alvéoles ouvertes, dites également poreuses; les autres usages (McCarthy, Bower et Jessen, 1977; Gamlen, Lane, Midgley et Steed, 1986).

La fiabilité de l'analyse de l'utilisation finale semble précise pour les grands marchés, c'est-à-dire les aérosols, la réfrigération et les mousses. Les subdivisions à l'intérieur de chaque catégorie sont moins dignes de confiance. La subdivision des mousses entre les poreuses et les cellulaires est difficile à vérifier à cause des écarts observés dans la communication des données sur les ventes par les compagnies. Dans un souci de confidentialité et en raison de la nature préliminaire des données sur la consommation, toutes les estimations pour 1990 reposent sur l'hypothèse que les marchés d'utilisation finale étaient proportionnels à ceux de 1987 (année pour laquelle les estimations ont été faites beaucoup plus en détail). La consommation totale de CFC en 1987 se chiffrait à environ 22 kt. En 1990, elle était descendue à environ 13 kt et, en 1991, à environ 9 kt (Environnement Canada, 1992b).

6.1.1 Scénarios des émissions

Émissions fugitives. Les méthodes qui ont servi à estimer les émissions sont décrites par Gamlen *et al.* (Gamlen, Lane, Midgley et Steed, 1986) et elles sont exposées très rapidement. Durant la fabrication des CFC, une partie du produit s'échappe directement dans l'atmosphère, sans délai. Selon les relevés effectués dans l'industrie, ces pertes se chiffrent environ à 3,3 % du CFC-12 et à 2,0 % du CFC-11.

On peut donc décrire ces émissions de la façon suivante : $E(F)_t = 0{,}02\ P_t$ pour le

CFC-11, où $E(F)_t$ correspond aux émissions fugitives au cours de l'année t; P_t est la production annuelle au cours de l'année t; $E(F)_t = 0{,}033\ P_t$ pour le CFC-12. Au Canada, ces émissions fugitives ont été estimées à 365 t en 1990.

Aérosols. Les émissions attribuables à l'emploi des aérosols ont été estimées à partir de l'hypothèse que la moitié de ces produits étaient dégagés dans l'atmosphère dans l'année de leur vente, l'autre moitié, l'année suivante, selon la relation suivante : $E(A)_t = 0{,}5\ V(A)_t + 0{,}5\ V(A)_{t-1}$, où V(A) représente les ventes annuelles. Les émissions dues à l'emploi des aérosols en 1990 ont été estimées à 127 t.

Systèmes de réfrigération de longue durée. Selon une analyse portant sur des réfrigérateurs et des congélateurs d'usage domestique, la durée moyenne de ces appareils est de 12 ans, les pertes vers l'atmosphère s'élevant à 2 % durant le remplissage (McCarthy, Bower et Jessen, 1977). Dans le calcul des estimations pour le Canada, on a posé que, sur la quantité totale de CFC-12 vendu pour la réfrigération, 8 % allaient dans des systèmes de longue durée, conformément aux résultats avancés par certains chercheurs (Gamlen, Lane, Midgley et Steed, 1986). L'analyse des tendances de la consommation au cours des années antérieures révèle que 58 % de la quantité de CFC-12 vendu pour aller dans les systèmes de longue durée est libéré chaque année. Donc, $E(ELD) = (0{,}08 \times P_t)\ 0{,}58$, où ELD signifie émissions de longue durée et où P_t représente la production canadienne totale de CFC destinés à la réfrigération. Les émissions reliées à l'emploi des réfrigérants de longue durée ont totalisé 262 t en 1990.

Systèmes de réfrigération de courte durée. On a proposé, pour les appareils de cette catégorie, une durée de quatre ans. On veut dire par là que le réfrigérant est rechargé tous les quatre ans et non que la durée du réfrigérateur n'est que de quatre ans. Les climatiseurs d'usage domestique et les climatiseurs de véhicules automobiles entrent dans cette catégorie. Pour 1990, les émissions totales ont été estimées à 3 965 t.

Mousses poreuses (à alvéoles ouvertes). Pour cet emploi des CFC, on a supposé une période de libération de deux mois : $E(AO)_t = 0{,}83\ V(AO)_t + 0{,}17\ V(AO)_{t-1}$, où V(AO) représente les ventes de mousses à alvéoles ouvertes. On estime que, en 1990, les rejets dans cette catégorie ont totalisé 607 t.

Mousses cellulaires (à alvéoles fermées). On peut subdiviser ces mousses en mousses rigides de polyuréthane et d'isocyanurate (CFC-11) ainsi qu'en mousses constituées d'autres molécules que les uréthanes, les mousses de polystyrène et quelques polyoléfines extrudées (surtout du CFC-12 lorsque l'agent de gonflement est un chlorofluorocarbure).

Par le passé, le CFC-12 a surtout servi au Canada à fabriquer des mousses de polystyrène plutôt que des polyoléfines. Dernièrement, les fabricants ont adopté plutôt les HCFC, mais les quantités utilisées sont confidentielles. Les données montrent que la plus grande partie des CFC s'échappe des produits vers l'atmosphère dans les deux ans qui suivent la fabrication, le taux en un an s'élevant à 75 %. Aussi, pour le CFC-12, on a l'équation suivante : $E(AF)_t = 0{,}5\ V(AF)_t + 0{,}5\ V(AF)_{t-1}$, où V(AF) représente les ventes de mousses à alvéoles fermées.

Quant au CFC-11, dont la plus grande partie sert dans les mousses de polyuréthane rigide (surtout dans le matériel de réfrigération et dans la construction), trois facteurs influent sur son dégagement : les pertes à la production, les pertes par diffusion pendant la durée de vie du produit et les pertes à l'élimination.

On estime que les émissions totales de CFC des mousses à alvéoles fermées totalisent 3 121 t.

Autres catégories. On y retrouve 17 % de la demande de CFC au Canada. Les principales utilisations sont celles du CFC-12, dans les mélanges de gaz stérilisants, et du CFC-113, à titre de solvant. Ces emplois sont assimilés aux aérosols en ce que le délai de libération des gaz est de six mois. Les émissions que l'on range dans cette catégorie au Canada, en 1990, ont été estimées à 2 210 t.

Les émissions totales de CFC, en 1990, sont résumées dans le tableau 37. À ces estimations, il faut ajouter la fraction des émissions non libérées au cours des années antérieures de la durée de service des produits. Les calculs qui précèdent peuvent tenir ou ne pas tenir compte du fait que la consommation de CFC a considérablement diminué de 1989 à 1990 et que, de 1985 à 1989, elle a été relativement stable. Les écarts sont dus en partie à l'évolution de l'usage sur lequel, à l'origine, se fonde la méthode d'estimation des émissions. La consommation de CFC de 1985 à 1990 a été comme suit : 19,2 kt en 1985; 20,6, en 1986; 21,9, en 1987; 21,7, en 1988; 19,6, en 1989; 13,6, en 1990.

La vitesse de dégagement des CFC emmagasinés dépend de chaque CFC et du type d'utilisation. Par exemple, les réfrigérateurs et les congélateurs d'usage domestique (à réfrigérants de longue durée) ont une durée de vie moyenne de 12 années ± 4, et leur remplissage s'accompagne d'une perte de 2 % (Gamlen, Lane, Midgley et Steed, 1986).

Les pertes de CFC-11 des mousses à alvéoles fermées sont dues à trois causes principales : pertes à la production, diffusion durant l'utilisation du produit et pertes à l'élimination. Selon les estimations actuelles, les pertes à la production se chiffrent à 10 %; elles sont suivies de pertes annuelles de 4,5 % pendant 20 ans, chiffres qui représentent l'effet combiné de la durée de vie du produit et des pertes par diffusion.

Même si certains CFC continueront de se libérer après la cessation graduelle de leur utilisation, qui doit survenir en 1996, aucune estimation précise n'est actuellement disponible, faute de renseignements sur le moment de l'abandon graduel des usages particuliers de ces produits et sur les formes à venir d'utilisation de ces substances. En outre, on manque de données sur la quantité totale de CFC *en réserve*.

Tableau 37 Rejets[a] de chlorofluorocarbures[b] au Canada (1990)

Source	Émissions (t)
Émissions fugitives	365
Aérosols	127
Réfrigérants de longue durée	262
Réfrigérants de courte durée	3 965
Mousses à alvéoles ouvertes	607
Mousses à alvéoles fermées	3 121
Autres	2 210
Total, CFC	**10 657**

[a] Selon la méthode mise au point par le *Fluorocarbon Program Panel*, de la *Chemical Manufacturers Association*.
[b] Y compris les CFC-11, -12, -113, -114 et -115.

6.2 *Les hydrochlorofluorocarbures*

En raison de la nature confidentielle des données et de l'absence consécutive de détails sur les utilisations finales, aucune tentative n'a été faite pour estimer les émissions dans le détail. En 1990, environ 8,4 kt de HCFC ont été consommées au Canada (Environnement Canada, 1992b). Même si les données sont limitées, pour les besoins du rapport, on a posé que la consommation égalait les émissions.

6.3 *Le tétrachlorure de carbone*

Le tétrachlorure de carbone (CCl_4) est à la fois produit et importé au Canada. Il sert principalement comme matière première dans la fabrication du CFC-11 et du CFC-12 (Corpus Information Services, 1990b). À ce titre il n'est pas directement libéré dans l'atmosphère. Les données dont on dispose pour 1989 montrent que quelque 803 t de CCl_4, soit environ 3 % de la consommation apparente, n'ont pas servi de matière première à la fabrication d'un produit (Environnement Canada, 1992b). Le pourcentage de cette quantité qui a été dégagée dans l'atmosphère n'a pas été estimé.

6.4 *Le méthylchloroforme*

Le 1,1,1-trichloroéthane, ou méthylchloroforme (CH_3CCl_3), sert principalement d'agent nettoyant des métaux. Selon les Corpus Information Services (Corpus Information Services, 1990c), la demande de CH_3CCl_3 en 1989 a totalisé environ 16 kt, dont on suppose que la totalité a fini par se retrouver dans l'atmosphère.

6.5 *Le tétrafluorométhane et l'hexafluoroéthane*

Durant la fabrication de l'aluminium de première fusion par électrolyse, il se forme deux fluorocarbures gazeux : le tétrafluorométhane (CF_4) et l'hexafluoroéthane (C_2F_6). Comme ces gaz peuvent absorber le rayonnement infrarouge, une forte accumulation dans l'atmosphère pourrait mener à l'accroissement de l'effet de serre (Wang, Pinto et Yung, 1981; Fabian, Borchers, Kruger et Lal, 1987).

Comme les polyfluorocarbures peuvent subsister des milliers d'années dans l'atmosphère, l'industrie de l'aluminium s'efforce de plus en plus d'en réduire les émissions afin de prévenir le problème (Alcan, 1992). Il faudra intensifier la recherche pour comprendre plus précisément le rôle de l'effet d'anode (durée, amplitude et nombre) et trouver les moyens de l'atténuer ou de le maîtriser. On ne comprend pas complètement tous les facteurs des émissions de polyfluorocarbures, mais il semble évident que ces composés se forment à la faveur des réactions secondaires qui ont presque exclusivement lieu lorsque le bain d'électrolyse ne renferme plus suffisamment d'alumine (effet d'anode).

À l'échelle du globe, les émissions ont été estimées entre 1 et 2 kg de CF_4 par tonne d'aluminium et entre 0,1 et 0,2 kg de C_2F_6 par tonne d'aluminium. Des mesures prises récemment en Norvège (Rosland, 1992) révèlent que les émissions provenant d'anciennes usines de production Sodeberg pourvues d'une anode ont un effet sur la fréquence de deux ou trois fois par jour dans l'intervalle de 1 à 3 kg de CF_4 par tonne d'aluminium, tandis que les émissions d'usines modernes seraient inférieures à 0,06 kg de CF_4 par tonne d'aluminium.

Les estimations préliminaires pour l'Amérique du Nord, fondées sur des données récentes, sont également beaucoup plus basses que celles pour la planète. Les émissions nord-américaines seraient dans l'intervalle de 0,2 à 0,8 kg de CF_4 par tonne d'aluminium. Les fonderies dernier cri rejettent le moins d'émissions (Alcan, 1992).

En 1990, le Canada a produit environ 1,8 Mt d'aluminium. D'après les coefficients de 0,8 kg de CF_4 et de 0,08 kg de C_2F_6 par tonne d'aluminium, les émissions maximales ont été estimées à 1,5 kt.

Section 7

Méthode de calcul des émissions de dioxyde de carbone

Le CO_2 est l'un des produits finals de la combustion de la matière organique (charbon, pétrole, gaz, bois) ainsi que de l'incinération des déchets. Les carbonates minéraux se décomposent, également sous l'effet de la chaleur, en CO_2 de même qu'en d'autres oxydes.

Comme le CO_2 est produit à la faveur de la combustion, le calcul des émissions est relativement simple. L'équation suivante, où ΔH est la chaleur de réaction et où C_xH_y désigne la formule générale d'un hydrocarbure, le montre bien.

$$C_xH_y + (x + \tfrac{1}{4}y)\,O_2 \rightarrow x\,CO_2 + \tfrac{1}{2}\,yH_2O + \Delta H \quad [1]$$

Pour chaque type de combustible, on peut exprimer les émissions annuelles de CO_2 comme le produit de trois termes : la quantité de combustible, la teneur en carbone de ce dernier et la fraction oxydée du combustible.

En outre, dans un souci de simplification, on a estimé les émissions attribuables aux combustibles fossiles en subdivisant ces derniers en trois catégories : les combustibles gazeux, liquides et solides. La méthode ressemble à celle de Marland et Rotty, qui ont estimé les émissions planétaires de CO_2 à partir d'un vaste échantillon de données sur la production de combustibles (Marland et Rotty, 1983; Organisation des Nations unies, 1978). En outre, tous les coefficients d'émission ont été ramenés en unités d'énergie afin de faciliter la comparaison entre les emplois énergétiques et les émissions de carbone.

7.1 Combustibles gazeux

7.1.1 Gaz naturel

Tous les chiffres sur la consommation des combustibles au Canada proviennent de Statistique Canada (Statistique Canada, 1991a, 1991b). Les quantités brûlées sont décrites dans la section 2.

La teneur en carbone d'un combustible est habituellement déterminée d'après la fraction d'hydrocarbures (en l'occurrence le méthane) du combustible. On a calculé que, en moyenne, la teneur en carbone du gaz naturel était de 524 g/m^3 (Keeling, 1973). Des travaux ultérieurs (Marland et Rotty, 1983) ont permis d'arriver à une valeur plus juste.

La composition du gaz peut varier grandement selon la source de celui-ci. Des recherches ont signalé que le gaz naturel à haut pouvoir calorifique se compose d'environ 95 % de méthane, de 4 % d'azote et de 1 % de gaz lourds (Considine, 1977). Ces taux diffèrent beaucoup de ceux que l'on trouve dans d'autres documents (Bureau of Mines, 1976). Le gaz naturel perd de son pouvoir calorifique lorsqu'on le débarrasse de ses liquides. En se fondant sur le gaz témoin américain décrit au tableau 38, en supposant la suppression de 20 % de l'éthane, de 72 % du propane et de tous les hydrocarbures lourds ainsi que de tout le H_2S, le CO_2 et le H_2O, on a calculé que le gaz résultant possédait un pouvoir calorifique de 9 103 kcal/m^3 (Marland et Rotty, 1983). Ce gaz sec contient 0,550 kg de C/m^3 à 0 °C et, compte tenu du CO_2 dont il a été débarrassé, il produirait 0,555 kg de C/m^3 après oxydation complète. À la température normale (60 °F), la teneur en carbone serait de 525,4 g de C/m^3.

Des recherches (Marland et Rotty, 1983) ont permis de constater que la teneur en carbone par unité d'énergie pouvait être fidèlement représentée par une relation linéaire avec le pouvoir calorifique comme suit :

$$C_g = 57{,}357 + 1{,}459 \times 10^{-3} (\Delta H_s - 8\,898) \qquad [2]$$

où C_g est la teneur en carbone (en g de C pour 1 000 kcal) et ΔH_s est le pouvoir calorifique supérieur* du gaz (en g de C pour 1 000 kcal et par mètre cube à 15,6 °C).

À cause des différences de composition des gaz, on trouve dans les publications beaucoup de valeurs du pouvoir calorifique du gaz naturel. La valeur de 38,90 MJ/m^3 a été signalée dans diverses publications (ONU, 1978; Hirschler, 1981). À l'aide de leur propre équation de régression ainsi que d'une valeur mondiale (moyenne supérieure) de 37,24 MJ/m^3, on est arrivé à une teneur en carbone (moyenne mondiale) du gaz naturel de 13,70 t/TJ (*cf.* tableaux 38 et 39) (Marland et Rotty, 1983).

Bien que l'Office national de l'énergie publie des coefficients de conversion de l'énergie brute (*cf.* tableau 40), ces valeurs ne pouvaient pas être corrélées à aucune année donnée, et il n'y avait aucun moyen de déterminer les quantités qui s'appliquaient à chaque coefficient (Office national de l'énergie, 1986, 1988). Comme Statistique Canada publie des coefficients de conversion révisés chaque année, compte tenu des écarts régionaux, on a choisi leur valeur moyenne du pouvoir calorifique de 37,78 MJ/m^3 comme chiffre représentatif du pouvoir calorifique du gaz naturel consommé au Canada en 1990 (Statistique Canada, 1991a).

En intégrant cette valeur de 37,78 MJ/m^3 (9 040 kcal/m^3) à l'équation [1], on arrive au résultat de 57,57 g de C pour 1 000 kcal, soit 13,76 t de C/TJ. Ce résultat est proche de celui qu'on a déjà obtenu (Marland et Rotty, 1983) et, également, de celui qu'on obtiendrait en faisant la moyenne des valeurs communiquées par l'Office national de l'énergie (*cf.* tableau 40).

De ce coefficient, il faut soustraire la fraction du combustible qui ne subit pas d'oxydation. Une fraction du gaz naturel consommé chaque année n'est pas oxydée à cause d'une combustion incomplète. Une fraction du carbone du gaz subsiste sous forme de suie, autour du brûleur, dans la cheminée, ou, encore, elle est libérée dans l'environnement. Même si la quantité exacte de ce carbone non oxydé est difficile à déterminer, une estimation prudente la fait fixer à 1,5 % (*cf.* sous-section 7.2). Le coefficient calculé pour estimer les émissions de CO_2 attribuables à la combustion du gaz naturel se chiffre donc à 13,55 t de C/TJ, soit 49,68 t de CO_2/TJ.

Ce coefficient a également été appliqué au torchage du gaz naturel. Bien que la teneur en carbone et, par conséquent, le contenu en énergie du gaz par gramme de combustible soient inférieurs dans le gaz brut, on estime que l'erreur consécutive à l'application du même coefficient est inférieure à celle qui découle de l'incertitude des hypothèses formulées sur l'oxydation. Au tableau 41, on résume les coefficients d'émission calculés pour le gaz naturel et le gaz distillé.

7.2 Combustibles liquides

Les liquides pétroliers ont été subdivisés en huit types de combustibles pour lesquels des coefficients d'émission distincts ont été calculés. À l'instar du gaz naturel, tous les chiffres sur la consommation de ces combustibles proviennent de Statistique Canada (Statistique Canada, 1991a, 1991b). Ces chiffres exprimés en unités physiques peuvent être trouvés dans la section 2.

On a déjà chiffré la composition en carbone des produits pétroliers liquides entre 79 et 87 % (Brame et King, 1967). Keeling utilise la moyenne de ces valeurs, soit 84 %

---

* Le pouvoir calorifique supérieur est la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'un combustible, y compris la chaleur latente de la vapeur d'eau des produits de la combustion.

Tableau 38 Composition du gaz naturel (pourcentage par volume)

Gaz sec, États-Unis (1976)	Moyenne mondiale pondérée	Valeur corrigée, 1976	Gaz de référence
Méthane	88,32	89,24	92,88
Éthane	4,65	4,52	3,91
Propane	2,12	1,95	0,62
Autres hydrocarbures	1,53	1,54	—
CO_2	0,92	0,78	—
Autres constituants	2,46	2,42	2,59
Pouvoir calorifique supérieur ($kcal/m^3$)	9 685,60	9 680,26	9 102,62

Tableau 39 Pouvoir calorifique moyen du gaz naturel sec

	États-Unis ($kcal/m^3$)	Monde ($kcal/m^3$)
1980	-	8 825
1979	9 068	8 839

Tableau 40 Contenu[a] énergétique brut du gaz naturel (MJ/m^3)

Colombie-Britannique	
Échelle provinciale	39,10
Huntingdon	39,10
Kingsgate	37,65
Grassy Point	38,20
Alberta	
Échelle provinciale	38,80
Cardston	37,65
Aden	36,06
Est du Canada	37,65
Moyenne canadienne	38,03

(Source : Office national de l'énergie, 1986, 1988)

[a] Pour le gaz naturel canadien consommé en 1990, on se sert de la valeur de 37,78 MJ/m^3 (pour plus de précisions, consulter le texte).

Tableau 41 Coefficients d'émission du dioxyde de carbone des combustibles gazeux

	Teneur en énergie (TJ/GL)	Carbone (g/m^3)	CO_2 (t/ML)	CO_2 (t/TJ)
Gaz naturel	37,78	512,46	1,88	49,68
Gaz distillé	41,73	565,42	2,07	49,68
Gaz de cokerie	18,61	436,36	1,60	86,00

(Keeling, 1973), tandis que Marland et Rotty utilisent 85 % (Marland et Rotty, 1983). Selon certains travaux, la teneur en carbone du pétrole brut et des liquides du gaz naturel est d'environ 95 % en masse (Zimen, Offermann et Hartmann, 1977). Sauf pour le propane, le présent document utilise pour tous les calculs la valeur supérieure signalée par Keeling, 87 % de carbone en masse.

Le tableau 42 montre le contenu énergétique et la masse volumique qui servent à la conversion des coefficients d'émission des combustibles liquides. Les contenus énergétiques sont tirées de Statistique Canada (Statistique Canada, 1991a, 1991b) ainsi que de l'Office national de l'énergie (Office national de l'énergie, 1986, 1988 et 1991a), tandis que l'intervalle des densités provient de l'Institute of Petroleum et de Perry et Chilton (Institute of Petroleum, 1973; Perry et Chilton, 1973). La masse volumique attribuée à l'huile lourde se fonde sur le coefficient d'émission calculé pour l'Alberta (EMR, 1990).

Afin de déterminer la fraction des combustibles liquides qui subissent l'oxydation, il faut d'abord estimer la fraction qui n'est pas complètement oxydée durant la combustion. On a effectué une approximation en comparant à la masse des combustibles liquides mis à brûler les émissions estimatives pour 1985 de composés organiques volatils (COV) et de particules totales en suspension (PTS) attribuables à ces combustibles. En 1985, 54 650 kt de combustibles liquides ont été brûlés au Canada (Statistique Canada, 1986). On a estimé à 1 027 kt et à 108 kt, respectivement, les émissions de COV et de PTS attribuables à cette combustion (Environnement Canada, 1989) (*cf.* tableau 43). Le CO, matière partiellement oxydée qui se forme durant la combustion et qui est rejetée dans l'atmosphère, est censé subir une oxydation complète assez rapide (de 0,1 à 0,4 an) (Bach, 1988). Autre produit d'une combustion inefficace, le CH_4 subit une oxydation complète à assez brève échéance (de 7 à 10 ans) (Bach, 1988; Marland et Rotty, 1983). Pour cette catégorie de composés, tout écart entre la quantité de carbone oxydé au cours d'une année donnée et la quantité qui correspondrait à l'oxydation complète du carbone rejeté au cours de l'année est donc dû à une modification de la consommation annuelle de combustible et de la formation de méthane. Comme la fraction de méthane et d'autres hydrocarbures alors formée est petite, l'hypothèse qu'une fraction équivalente de matières est oxydée chaque année ne devrait pas causer d'erreur importante.

En conséquence, 1,14 Mt ou 2,1 % de la masse totale des combustibles (somme des émissions de COV et de PTS) représente la matière incomplètement oxydée au cours de la combustion de combustibles liquides. Toutefois, une fraction de ces matières finit par s'oxyder. Beaucoup des hydrocarbures émis, surtout par les gaz d'échappement, sont

Tableau 42 Densité, masse volumique et contenu énergétique de certains combustibles et carburants

Combustible ou carburant	Intervalle de densité	Masse volumique (kg/L)	Contenu énergétique (TJ/ML)
Essences automobiles	0,71 à 0,79	0,75	34,66
Essences d'aviation	0,70 à 0,78	0,74	33,52
Kérosènes	0,78 à 0,84	0,81	37,68
Gazoles	0,82 à 0,92	0,87	38,68
Huiles légères	0,85 à 0,95	0,90	38,68
Huiles lourdes	0,92 à 0,99	0,98	41,73
Carburéacteur	0,78 à 0,84	0,81	35,93
Propane	0,508	0,51	25,53
Butane	0,579	0,58	28,62
Éthane	0,377	0,38	18,36

fortement réactifs (National Research Council, 1979). Les données relatives aux aérosols urbains montrent que ceux-ci contiennent environ 20 % de carbone (National Research Council, 1979; Marland et Rotty, 1983). C'est pourquoi la fraction des combustibles liquides qui, après combustion, reste dans l'environnement à l'état non oxydé a été estimée, chaque année, à 1,5 %.

Pour chaque combustible liquide, on a estimé les émissions de CO_2 en tonnes de carbone, par conversion du contenu énergétique des combustibles (*cf.* tableau 42) en unités de masse par unité d'énergie, à l'aide des masses volumiques figurant au tableau 43 multipliées par la teneur convenable en carbone et par la différence entre l'unité et le taux de combustible non oxydé, soit 0,985. Les coefficients d'émission ainsi calculés figurent au tableau 44.

7.3 Combustibles solides

7.3.1 Charbons

Comme pour les combustibles gazeux et liquides, les émissions de CO_2 sont directement liées à la quantité de combustibles utilisés, à la teneur en carbone de ces derniers ainsi qu'à la fraction oxydée. La consommation de ces combustibles est tirée de la documentation (Statistique Canada, 1991a, 1991b). En ce qui concerne les charbons, des coefficients d'émission ont été calculés pour le lignite, le charbon subbitumineux, le charbon bitumineux canadien, le charbon bitumineux américain et l'anthracite. La teneur en carbone des charbons varie considérablement d'une région à l'autre du Canada (Lauer, 1990; EMR, 1990), ce que traduisent les coefficients d'émission. Les coefficients d'émission utilisés sont fondés sur l'analyse des différents charbons utilisés au Canada (Lauer, 1990) (*cf.* tableau 45). Ces coefficients, semblables aux coefficients calculés dans le dernier inventaire national des émissions de CO_2, se fondent sur des renseignements tirés de plusieurs publications (Environnement Canada, 1982; Association canadienne de l'électricité, 1985; Marks, 1978; Campbell, 1986). Le tableau 46 donne, pour les cinq types de charbons utilisés au Canada, le pourcentage (moyen) en poids de carbone et

Tableau 43 Consommation de combustibles liquides au Canada (1985)

Combustible	Volume ($\times 10^3$ m^3)	Masse volumique (t/m^3)	Masse (kt)
Essence automobile	32 732	0,75	24 549
Kérosène	860	0,81	697
Gazole	15 007	0,87	13 056
Huile légère	7 344	0,90	6 609
Huile lourde	4 523	0,98	4 433
Essences d'aviation	177	0,74	131
Carburéacteur	4 300	0,81	3 483
Propane	3 319	0,51	1 692
Total			**54 650**

Tableau 44 Coefficients d'émission du dioxyde de carbone

Combustibles liquides	Contenu en énergie (TJ/ML)	C (g/L)	CO_2 (t/kL)	CO_2 (t/TJ)
Essence automobile	34,66	642,60	2,36	67,98
Kérosène	37,68	695,20	2,55	67,65
Essences d'aviation	33,52	634,20	2,33	69,37
Propane	25,53	416,65	1,53	59,84
Butane	28,62	479,18	1,76	61,38
Éthane	18,36	301,63	1,11	60,24
Gazole	38,68	745,75	2,73	70,69
Huile légère	38,68	771,28	2,83	73,11
Huile lourde	41,73	842,18	3,09	74,00
Carburéacteur	35,93	694,17	2,55	70,84
Coke de pétrole	42,38	787,20	2,89	100,10

la teneur en énergie (Office national de l'énergie, 1986; Statistique Canada, 1988).

Pour déterminer la fraction du carbone du charbon qui reste non oxydée, on a adopté une méthode semblable à celle de Marland et Rotty et du Carbon Dioxide Information and Analysis Center (Marland et Rotty, 1983; Carbon Dioxide Information and Analysis Center, 1988). Au Canada, plus de 80 % du charbon est brûlé dans les centrales d'électricité. Les données sur les produits de la combustion effectuée dans ces installations devraient être représentatives de la plus

Tableau 45 Coefficients d'émission du CO_2 attribuables aux charbons

Province	Type de charbon[a]	Carbone (t/t)	CO_2 (t/t)	CO_2 (t/TJ)
Nouveau-Brunswick	Bit. H.T.M.V.	0,609	2,333	83,0
Nouvelle-Écosse	Bit. H.T.M.V.	0,626	2,295	84,5
Québec	Bit. T.M.M.V.	0,682	2,501	85,9
	Anthracite	0,651	2,387	86,2
Ontario	Lignite	0,407	1,492	93,8
	Bit. B.T.M.V.	0,688	2,523	91,6
	Bit. T.M.M.V. pour centrales (É.-U.)	0,682	2,501	85,9
	Bit. T.M.M.V. pour aciéries (É.-U.)	0,670	2,457	81,6
Manitoba	Lignite	0,415	1,522	95,0
	Bit. B.T.M.V.	0,688	2,523	91,6
Saskatchewan	Lignite	0,366	1,342	93,8
Alberta	Subb.	0,474	1,738	94,3
	Bit. B.T.M.V.	0,464	1,702	94,3
Colombie-Britannique	Bit. B.T.M.V.	0,464	1,702	94,3
Coke		0,676	2,479	86,0

[a] H.T.M.V. : haute teneur en matières volatiles; T.M.M.V. : teneur moyenne en matières volatiles; B.T.M.V. : basse teneur en matières volatiles; Bit. : charbon bitumineux; Subb. : charbon subbitumineux.

grande partie du charbon utilisé. L'analyse des mâchefers de la centrale de Battle River (Association canadienne de l'électricité, 1985) a donné les résultats suivants : teneur moyenne en charbon de 5,5 %, les mâchefers équivalant en moyenne à 12,25 % de la quantité totale du charbon chargé dans les chaudières. À la lumière de ces résultats et d'une teneur moyenne en carbone de 50 % dans le charbon, le taux de carbone subsistant imbrûlé dans les mâchefers est de 1,35 %. L'examen des données obtenues à la centrale Bull Run, de la *Tennessee Valley Authority* (Marland et Rotty, 1983), montre qu'entre 0,14 et 2,7 % de la fraction combustible du charbon reste imbrûlée. On a donc posé que 1,0 % du carbone présent dans le charbon brûlé dans les chaudières est rejeté sans avoir été brûlé.

Il faut également estimer la fraction non oxydée du charbon non utilisé comme combustible. À la lumière de renseignements fournis par le département américain de l'Énergie et Marland et Rotty, environ 5,91 % du charbon envoyé dans les cokeries est

Tableau 46 Caractéristiques des charbons consommés au Canada

Province	Type de charbon[a]	Teneur en énergie (TJ/kt)	Teneur en carbone (%)
Nouveau-Brunswick	Bit. H.T.M.V.	26,90	61,5
Nouvelle-Écosse	Bit. H.T.M.V.	27,15	63,2
Québec	Bit. T.M.M.V.	29,12	68,9
	Anthracite	27,70	65,8
Ontario	Lignite	15,90	41,1
	Bit. B.T.M.V.	27,53	69,5
	Bit. T.M.M.V. pour centrales (É.-U.)	29,12	68,9
	Bit. T.M.M.V. pour aciéries (É.-U.)	30,10	71,2
Manitoba	Lignite	16,01	41,9
	Bit. B.T.M.V.	27,53	69,5
Saskatchewan	Lignite	14,31	37,0
Alberta	Subb.	18,44	47,9
	Bit. B.T.M.V.	18,04	46,9
Colombie-Britannique	Bit. B.T.M.V.	18,04	46,9
Coke		28,83	68,3

[a] H.T.M.V. : haute teneur en matières volatiles; T.M.M.V. : teneur moyenne en matières volatiles; B.T.M.V. : basse teneur en matières volatiles; Bit. : charbon bitumineux; Subb. : charbon subbitumineux.

transformé en huile légère et en goudron brut (*cf.* tableau 47) (Department of Energy, 1982; Marland et Rotty, 1983). En outre, ces sous-produits servent surtout dans l'industrie chimique et, à ce titre, ils ne subissent pas d'oxydation dans le délai sur lequel portent les estimations du présent rapport. Les industries canadienne et américaine des sous-produits du coke se ressemblent; on peut donc calculer les émissions en réduisant de 6,0 % la quantité de charbon signalée comme ayant été utilisé pour produire du coke. Ce faisant, on ne tient toutefois pas compte du coke utilisé dans les provinces qui n'en produisent pas. On a donc calculé les émissions en appliquant un coefficient général d'émission de 86 t/TJ à la fois au coke et au gaz de cokerie (EMR, 1990).

7.3.2 Bois et ordures

La combustion des autres combustibles solides tels que le bois de chauffage, les ordures et les rémanents se traduit également par des émissions de CO_2. On calcule

Tableau 47 Production d'huile légère et de goudron à partir du charbon, dans les cokeries

Année	Huile légère brute et goudron (Mt)[a]	Charbon envoyé dans les cokeries (Mt)[a]	Taux de charbon transformé en huile légère et en goudron (%)
1980	3,63	60,51	6,00
1979	4,01	69,94	5,74
1978	3,68	64,77	5,68
1977	4,03	70,49	5,72
1976	4,36	76,84	5,68
1975	4,40	75,84	5,80
1974	4,68	81,83	5,71
1973	5,01	85,37	5,87
1972	5,04	79,56	6,33
1971	4,61	75,48	6,11
1970	5,25	87,54	6,00
1969	5,36	84,73	6,33

[a] Les valeurs sont en mégatonnes d'équivalent-charbon par unité de pouvoir calorifique.

facilement le coefficient d'émission imputable à la combustion du bois et des rémanents (Hirschler, 1981). Si on pose que la composition chimique du bois est semblable à celle de la cellulose, c'est-à-dire que sa formule brute est $C_6H_{12}O_6$ et que la combustion est complète, on arrive à un coefficient de 1,47 t de CO_2 par tonne de bois, soit 0,40 t de C par tonne. Le pouvoir calorifique moyen des ordures ménagères se situe entre 8,4 et 12,7 MJ par kilogramme (Burns et Seaman, 1973). Un pouvoir calorifique intermédiaire de 10,6 MJ par kilogramme correspond à 37 % du pouvoir calorifique du charbon anthraciteux (Hirschler, 1981). Comme la transformation de la matière organique en CO_2 est à l'origine de presque toute la chaleur dégagée par les déchets incinérés, on a estimé les émissions de CO_2 par tonne de déchets incinérés à environ 35 % des émissions qui se dégagent de la combustion d'une tonne de charbon anthraciteux, soit 0,246 t de C par tonne de déchets incinérés.

7.4 Procédés industriels

7.4.1 Cimenteries et fours à chaux

Deux industries émettent du CO_2, directement ou non, du fait de la combustion. Ce sont les cimenteries et les fours à chaux. Le ciment est habituellement fabriqué dans un four où le carbonate de calcium ($CaCO_3$) de roches riches en calcium (calcaire, craie ou marne) est décomposé en CO_2 et en oxyde de calcium (CaO). Celui-ci finit par se combiner aux silicates de l'argile ou de l'ardoise pour former des silicates di- et tricalciques (Helmuth, Millet, O'Connor et Greening, 1979). Il se forme également des aluminates de calcium dans le clinker du ciment Portland. La teneur moyenne mondiale en calcaire du ciment se situe entre 60 et 67 % (Orchard, 1973). L'estimation des émissions se fonde

sur un taux médian de 63,5 %. Par division de la masse molaire du CO_2 par celle de l'oxyde de calcium et par multiplication du quotient par le taux d'oxyde de calcium dans le ciment, on a calculé un coefficient d'émission de 0,136 t de C par tonne de ciment produit.

Ainsi, pour le ciment :

(12,01 g/mole de C)/(56,08 g/mole de CaO) × 0,635 = 0,136 t de C ou 0,5 t de CO_2

et pour la chaux :

(12,01 g/mole de C)/(56,08 g/mole de CaO) × 1 = 0,214 t de C ou 0,79 t de CO_2

Pour le ciment, c'est la valeur utilisée dans diverses publications (Hirschler, 1981; Acres International Limited, 1987; Carbon Dioxide Information and Analysis Center, 1988).

Le procédé par lequel on produit le plus d'ammoniac (NH_3) au Canada est le procédé Haber-Bosh (Geadah, 1985). On fait réagir l'azote et l'hydrogène dans un rapport de 1 à 3, à température et à pression élevées. L'hydrogène est obtenu du gaz naturel. Les matières et l'énergie nécessaires à la fabrication d'une tonne d'ammoniac sont décrites au tableau 48 (Industrial Chemicals, 1980).

Selon ce bilan matières et selon l'hypothèse que tout le carbone du gaz naturel est finalement rejeté dans l'environnement, on a calculé le coefficient d'émission du CO_2 relié à la fabrication de l'ammoniac. En supposant que la teneur en carbone du gaz naturel est de 525 g par tonne et qu'il faut 812 m^3 de gaz naturel pour produire une tonne d'ammoniac, on arrive à un coefficient d'émission de 0,426 t de C par tonne d'ammoniac produit.

L'industrie des pâtes et papiers est un gros consommateur de bois, tant pour la fabrication du papier que pour la production d'énergie. La principale source de CO_2 dans cette industrie est la combustion des liqueurs noires et des résidus de bois. Les liqueurs noires renferment en moyenne 14 TJ d'énergie par tonne (Statistique Canada, 1991a). On a estimé le coefficient d'émission du CO_2 de cette industrie en posant comme hypothèse que les liqueurs noires renfermaient en moyenne 41 % de carbone (Rydholm, 1965; McCubbin, 1983) et que 95 % du carbone de ce combustible est dégagé durant sa combustion. Le carbone des liqueurs noires n'est pas entièrement craché par la cheminée de la chaudière de récupération : une partie forme du Na_2CO_3. Le carbone de ce composé traverse les diverses étapes du cycle de récupération et il finit par être dégagé sous forme de CO_2 par la cheminée du four à chaux (Wellisch, 1992). Ces petites pertes de carbone sont remplacées par l'appoint de $CaCO_3$ qui se transforme en CaO et en CO_2 dans le four à chaux ou par l'appoint de CaO qui ne se traduit pas par des émissions supplémentaires de CO_2 à l'usine. On a supposé, de façon très prudente, que le calcaire d'appoint représentait un taux de 5 % (Wellisch, 1992). En unités d'énergie, le coefficient d'émission ainsi calculé pour les liqueurs noires se chiffre à 102,01 t de CO_2/TJ. Dans le tableau 7, on trouvera la composition des diverses liqueurs noires produites par les différents procédés. Le tableau 49 résume les coefficients d'émission de chaque source de CO_2.

7.4.2 Emplois non énergétiques du charbon, du coke et du coke de pétrole

Dans la présente subdivision, il sera question de l'emploi des combustibles fossiles à d'autres fins que la production d'énergie. Les produits non énergétiques, énumérés au tableau 49, immobilisent mal le carbone qu'ils renferment.

Dans le cas du charbon, du coke et du coke de pétrole, on a posé que les émissions découlant de l'emploi non énergétique de ces matières égalaient la totalité du carbone que celles-ci renfermaient.

Les principales industries qui signalent ces emplois non énergétiques sont l'industrie des

Tableau 48 Besoins en matières et en énergie pour la production d'une tonne d'ammoniac liquide

Gaz naturel (92 % de CH_4)	812	m^3
Catalyseur de conversion	0,15	kg
Catalyseur de synthèse	0,25	kg
Soude caustique (100 %)	4,00	kg
Monoéthanolamine	0,15	kg
Gaz combustible (pour faire fonctionner les compresseurs)	7 108	kWh
Électricité	119	kWh
Eau	25	m^3

mines de fer, la sidérurgie, l'industrie de l'aluminium et l'industrie des appareils électriques.

L'*industrie des mines de fer* mêle de la poussière de coke au concentré de minerai de fer lors du bouletage. Bien que ce procédé soit considéré comme un emploi non énergétique de la poussière de coke, cette dernière s'oxyde durant le durcissement des boulettes.

La *sidérurgie* consomme du charbon bitumineux et du coke dans la fabrication des électrodes de carbone utilisées pour la fusion de la ferraille dans les aciéries électriques. Les mini-aciéries produisent environ 30 % de tout l'acier fabriqué au Canada.

Par mélange du coke de pétrole et du brai de houille, l'*industrie de l'aluminium* obtient une pâte qui est cuite sous forme de blocs de carbone, qui servent d'anodes durant l'élaboration électrolytique de l'aluminium pur. En moyenne, les fonderies modernes d'aluminium qui emploient les anodes précuites en consomment pour environ 0,45 à 0,48 kg par kilogramme d'aluminium produit.

À partir de coke et de coke de pétrole, l'*industrie des appareils électriques* fabrique des électrodes de graphite synthétique. Elle mélange 70 % en poids de coke de pétrole avec du brai (25 % en poids) et des additifs (5 % en poids). Le mélange est ensuite extrudé, cuit et graphité. Cette dernière opération est pratiquée dans un four électrique. Les électrodes de graphite servent dans l'industrie des ferro-alliages et du phosphore ainsi qu'à la fabrication de blocs d'anodes pour les fonderies d'aluminium.

Bref, la plus grande partie de l'emploi non énergétique du charbon, du coke et du coke de pétrole donne lieu à une oxydation du carbone présent (Coombs et Lomas, 1992).

Tableau 49 Sources industrielles des émissions de dioxyde de carbone

	Facteurs d'émission		
	C	CO_2	CO_2
Combustibles solides	(g/kg)	(g/kg)	(t/TJ)
Bois de chauffage			
résidentiel	400,00	1 466	81,47
industriel	400,00	1 466	81,47
Brûlage des rémanents	400,00	1 500	81,47
Incinération	250,00	916	-
Procédés	(g/kg)	(kg/kg)	(t/TJ)
Cimenteries	140,00	0,513	-
Fours à chaux	215,00	0,788	-
Fabrication de l'ammoniac	430,00	1,577	-
Liqueurs noires	410,00	1,503	107,38
Produits non énergétiques			
Matières premières de la pétrochimie	0,68 t C/m^3 × 0,2	-	14,22
Naphtas	0,68 t C/m^3 × 0,2	-	14,2
Huiles de graissage	0,77 t C/m^3 × 0,5	-	36,01
Autres produits	0,79 t C/m^3 × 0,5	-	28,88
Gaz naturel	0,67 × facteur d'émission du carburant		33,35
Gaz de pétrole liquéfiés	0,20 × facteur d'émission du carburant		12,00
Gaz de cokerie	1,0 × facteur d'émission du carburant		86,00
Coke	1,0 × facteur d'émission du carburant		86,00
Charbons	1,0 × facteur d'émission du carburant		(81,60 à 86,00)

Références

Acres International Limited, «Energy Consumption and CO_2 Emission Trends in Canada - An Update», rapport préparé pour le Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Toronto (Ontario), 1987.

Agriculture Canada, information fournie au groupe de travail fédéral sur les sources et les puits, 1990.

Alcan, lettre et dossier d'information envoyés de J.M. Sala à L. Buffa, Environnement Canada, août 1992.

Apps, M.J., lettre au groupe de travail fédéral sur les sources et les puits, juillet 1990.

Apps, M.J. et W.A., Kurz, «The Role of Canadian Forests and Forest Sector Activities in the Global Carbon Balance», *in*: *World Resources Review, 3(4)*: 333-343, 1991.

Association canadienne de l'électricité, «Characterization of Trace Constituents at Canadian Coal-fired Power Plants», rapport de recherche, vol. 1, 1985.

Association canadienne de l'électricité et CANMET, «Final Draft of Report Measuring Emissions from Canadian Utilities», 1990.

Association canadienne du gaz (ACG), «The Significance of Methane Emissions from Natural Gas Operations in Canada Relative to the Natural Environment and Global Warming», décembre 1989.

Bach, W., «The Endangered Climate», Centre de climatologie appliquée et d'études de l'environnement, université de Münster, version préliminaire, rapport nº 15, Allemagne de l'Ouest, 1988.

Baldwin, R.L. et M.J. Allison, «Rumen Metabolism», *in*: *Journal of Animal Science, 57*: 461-477, 1983.

Benzing-Purdie, L., Agriculture Canada, communication personnelle, 1992.

Bingemer, H.G. et P.J. Crutzen, «The Production of Methane from Solid Wastes», *in*: *Journal of Geophysical Research, 92(2)*: 2181-2187, février 1987.

Blaxter, K.L. et J.L. Clapperton, «Prediction of the Amount of Methane Produced by Ruminants», *in*: *British Journal of Nutrition, 19: 511-522, 1965.*

Bonnor, G.M., «Inventaire de la biomasse forestière du Canada», Institut national de foresterie, Service canadien des forêts, Petawawa (Ontario), 1985.

Boyle, T., Forêts Canada, communication personnelle, 1992.

Brame, J.S.S. et J.G. King, «Fuel: Solid, Liquid and Gaseous», 6e édition, St. Martin's Press, New York, New York, 1967.

Burns, J.A. et M.J. Seaman, «Some Aspects of Solid Waste Disposal», chapitre 22 *in*: *Our Environment: the Outlook for 1980*, A.J. Van Tassel, éd., D.C. Heath and Co., Lexington, Massachusetts, 1973.

Campbell, C.A., V.O. Biederbeck, R.P. Fentner et G.F. Lafond, «Effect of Crop Rotations and Cultural Practices on Soil Organic Matter, Microbial Biomass and Respiration in a Thin Black Chernozem», *in*: *Canadian Journal of Soil Science, 71*: 363-376, 1991.

Campbell, I.M., «Energy and the Atmosphere - A Physical Chemical Approach»,

2e édition, John Wiley and Sons, Toronto (Ontario), 1986.

Carbon Dioxide Information and Analysis Center (CDIAC), «Estimates of CO_2 Emissions from Fossil Fuel Burning and Cement Manufacturing Using the United Nations Energy Statistics and the U.S. Bureau of Mines Cement Manufacturing Data», Environmental Sciences Division at Oak Ridge National Laboratory, ORNL/CDIAC-25 NDP, 1988.

Casada, M.E. et L.M. Safley, Jr., «Global Methane Emissions from Livestock and Poultry Manure», Biological and Agricultural Engineering Department, North Carolina State University, juin 1990.

Collis, G.A., lettre de l'Institut canadien des engrais, mars 1992a.

Collis, G.A., lettre de l'Institut canadien des engrais, juin 1992b.

Considine, B.M., *Energy Technology Handbook*, McGraw Hill, New York, New York, 1977.

Coombs, A. et R. Lomas, note de service sur les utilisations du charbon et du coke, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa (Ontario), 1992.

Corpus Information Services, «Nitric Acid», *CPI Product Profiles*, 1990a.

Corpus Information Services, «Carbon Tetrachloride», *CPI Product Profiles*, 1990b.

Corpus Information Services, «1,1,1 Trichloromethane», *CPI Product Profiles*, 1990c.

Corpus Information Services, «Adipic Acid», *CPI Product Profiles*, 1991.

Crutzen, P.J., «Methane's Sinks and Sources», *in*: *Nature, 350*: 380-381, 1991.

Crutzen, P.J., I. Aselmann et W. Seiler, «Methane Production by Domestic Animals, Wild Ruminants, Other Herbivorous Fauna and Humans», *in*: *Tellus, 38B*: 271-284, 1986.

Dasch, J.M., «Nitrous Oxide Emissions from Vehicles», *in*: *Journal of Air Waste Management Association, 42*: 63-67 janvier 1992.

De Soete, G., «Updated Evaluation of Nitrous Oxide Emissions from Industrial Fossil Fuel Combustion», ébauche finale préparée pour la Communauté européenne de l'énergie atomique, Institut français du pétrole, Réf. 37-559, 1989.

Dickenson, R.E. et R.J. Cicerone, «Future Global Warming from Atmospheric Trace Gases», *in*: *Nature, 319*: 109-115, 1986.

Eichner, M.J., «Nitrous Oxide Emissions from Fertilized Soils: Summary of Available Data», *in*: *Journal of Environmental Quality, 19*: 272-290, 1990.

Énergie, Mines et Ressources (EMR), «National Study of the Viability of Using Wood for Domestic Heating», Division de l'énergie renouvelable, Direction du charbon et des énergies de remplacement, Ottawa (Ontario), 1984.

Énergie, Mines et Ressources (EMR), «Emission Factors for Greenhouse and Other Gases by Fuel Type: An Inventory», comité spécial des facteurs d'émission, Ottawa (Ontario), décembre 1990.

Énergie, Mines et Ressources (EMR), «Electric Power in Canada 1990», Ottawa (Ontario), 1991.

Énergie, Mines et Ressources (EMR), «Cement Production», *in*: *Canadian*

Minerals Yearbook 1990 - Review and Outlook, Ottawa (Ontario), 1991a.

Énergie, Mines et Ressources (EMR), «Lime Production», *in*: *Canadian Minerals Yearbook 1990 - Review and Outlook*, Ottawa (Ontario), 1991b.

Environnement Canada, «Inventaire national des sources naturelles d'émission de composés d'azote», Direction générale de l'assainissement de l'air, Ottawa (Ontario), rapport d'analyse économique et technique, rapport EPS 3-AP-80-4F, 1981.

Environnement Canada, «Les éléments à l'état de traces dans les charbons canadiens», Direction générale de l'assainissement de l'air, Ottawa (Ontario), rapport de l'analyse économique et technique, rapport EPS 3-AP-82-6, 1982.

Environnement Canada, «Étude de l'industrie canadienne des engrais-évaluation des techniques antipollution». Conservation et Protection, Ottawa (Ontario), rapport SPE 2/AG/1, 1987.

Environnement Canada, «Terres humides du Canada», rapport du Groupe de travail national sur les terres humides, Comité canadien de classification écologique du territoire, Service canadien de la faune, Ottawa (Ontario), rapport n° 24, 1988.

Environnement Canada, «National Inventory of NO_x, SO_2, VOC, CO and TSP», Division de la gestion des inventaires, Conservation et Protection, Ottawa (Ontario), (ébauche), 1989.

Environnement Canada, «Émissions des principaux polluants atmosphériques au Canada et tendances (1970 à 1980)», Direction générale de l'assainissement de l'air, Ottawa (Ontario), rapport SPE 7/AP/17, 1990.

Environnement Canada, statistiques sur les tendances de l'emploi des CFC, des HCFC, etc., Direction des produits chimiques commerciaux, renseignements confidentiels, Ottawa (Ontario), mars 1992a.

Environnement Canada, mémoire et dossier d'information fournis par Y. Bovet, Direction des produits chimiques commerciaux, Ottawa (Ontario), 1992b.

EPRI Journal, Electric Power Research Institute, «Earth's Climate in Transition (1986)», article distribué à la Conference on Global Climate Change Linkages, Washington, D.C., 1988.

États-Unis, Bureau of Mines, vol.1, «Metals, Minerals and Fuels», *Minerals Yearbook*, Bureau of Mines, Washington, D.C., 1976.

États-Unis, Department of Energy, «Coke and Coal Chemicals in 1980», Washington, D.C., DOE/EIA0120(80), 1982.

États-Unis, Environmental Protection Agency (EPA), «Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Volume 1, Stationary Point and Area Sources», AP-42, 4e édition, septembre 1985.

États-Unis, Environmental Protection Agency (EPA), «EPA/IPF European Workshop on the Emission of Nitrous Oxide from Fossil Fuel Combustion (Rueil-Malmaison, France)», préparé par l'Air and Energy Engineering Research, Research Triangle Park, Raleigh, Caroline du Nord, rapport n° EPA-600/9-89-089, 1989.

Fabian, P., R. Borchers, B.C. Kruger et S. Lal, «CF_4 and C_2F_6 in the Atmosphere», *in*: *Journal of the American Geophysical Union*, article FD0506, 1987.

Falls, R., lettre de Westcoast Energy à A. Jaques, octobre 1991.

Finlay, P.G., «Preliminary Business Plan (GERAP) 92/93», ébauche sommaire préparée par le gestionnaire du programme d'évaluation et de communication de données sur les émissions des gaz à effet de serre, mars 1992.

Forêts Canada, «Inventaire des forêts du Canada, 1986», Centre d'édition du gouvernement canadien, Ottawa (Ontario), 1988.

Forêts Canada, «Does Slashburning Increase Atmospheric Carbon Dioxide Levels?» fiche d'information du Centre de foresterie du Pacifique, Victoria (Colombie-Britannique), 1990a.

Forêts Canada, «L'état des forêts au Canada», rapport au Parlement canadien, Ottawa (Ontario), 1990b.

Fung, I., J. John, J. Lerner, E. Matthews, M. Prather, L.P. Steele et P.J. Fraser, «Three-dimensional Model Synthesis of the Global Methane Cycle», *in*: *Journal of Geophysical Research, D7*: 13 033-13 065, 1991.

Gamlen, P.H., B.C. Lane, P.M. Midgley et J.M. Steed, «The Production and Release to the Atmosphere of CCl3 and CCl2F2», *in*: *Atmospheric Environment, 20(6)*: 1077-1085, 1986.

Geadah, M.-L., «Inventaire national des sources et des émissions naturelles et anthropiques d'ammoniac (1980)», Environnement Canada, Ottawa (Ontario), rapport EPS 5/IC/1, 1985.

Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), «Scientific Assessment of Climate Change», rapport préparé pour le groupe de travail nº 1 du GIEC, 1990.

Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), «Climate Change 1992», rapport supplémentaire à l'évaluation scientifique du GIEC, Houghton, J.T., B.A. Callander et S.K. Varney (éd.), publié pour le GIEC, Cambridge University Press, février 1992.

Hao, W.M., S.C. Wotsy, M.B. McElroy, J.M. Beer et M.A. Togan, «Sources of Atmospheric Nitrous Oxide from Combustion», *in*: *Journal of Geophysical Research, 92*: 3098-3104, 1987.

Helmuth, R.A., F.M. Miller, T.R. O'Connor et N.R. Greening, *Encyclopedia of Chemical Technology*, vol. 5, New York, NY, John Wiley and Sons, New York, New York, 1979.

Hicks, A.M., «Methane Emissions from Livestock, Poultry and Wildlife», préparé pour B.H. Levelton and Associates Ltd. et la province de la Colombie-Britannique, 1991.

Hirschler, M.M., «Man's Emission of Carbon Dioxide into the Atmosphere», *in*: *Atmospheric Environment, 15(5)*: 719-727, 1981.

Hollingshead, B., «Methane Emissions from Canadian Coal Operations: A Quantitative Estimate», Coal Mining Research Company, C1 8936, mars 1990.

ICI, lettre de A. McCulloch, ICI Chemicals and Polymers Ltd., Runcorn, Royaume-Uni, juillet 1991.

«Industrial Chemicals», W.L. Faith, D.B. Keyes et R.L. Clark, 3e édition, John Wiley and Sons, New York, New York, 1980.

Institut canadien des engrais, renseignements fournis par l'Institut, 1992.

Institute of Petroleum, Grande-Bretagne, «Modern Petroleum Technology», 4e édition, G.D. Hobson and W. Phol

(éditeurs), Applied Science Publishers, Barking, Royaume-Uni, 1973.

Janzen, H.H., «Agriculture Canada Fact Sheet Fertilizer Promotes Soil Conservation», Agriculture Canada, Ottawa (Ontario), février 1986.

Janzen, H.H., lettre au président du Comité de l'environnement de l'Institut canadien des engrais, mai 1992.

Jaques, A.P., «Inventaire national des sources et des émissions de dioxyde carbone», Conservation et Protection, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), rapport SPE 5/AP/2, mai 1990.

Keeling, C.D., «Industrial Production of Carbon Dioxide from Fossil Fuels and Limestone», *in*: *Tellus 25*: 174-198, 1973.

Kim, A.G. «Experimental Studies of the Origin and Accumulation of Coalbed Gas», U.S. Bureau of Mines, Department of the Interior, Washington, D.C., R.I. 8317, 1978.

Kinsman, R., «Methane and Carbon Dioxide Emissions from Farm Animals», rapport d'étape n° 1 préparé pour Agriculture Canada, Ottawa (Ontario), 1992.

Kirchgessner, M., M.L. Muller et W. Windish, «Energy Transfer in Livestock Production - Aspects of Nutrition and Feeding», *in*: *Animal Nutrition, 41(5)*: 467-485, 1991.

Kuhnke, D.H., «Statistiques sylvicoles canadiennes : résumé couvrant une période de 11 ans», Centre de foresterie du Nord, Forêts Canada, Ottawa (Ontario), rapport d'information NOR-X-301, 1989.

Kurz, W.A., M.J. Apps, T. Webb et P. McNamee, «The Contribution of Biomass Burning to the Carbon Budget of the Canadian Forest Sector: A Conceptual Model» *in*: *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*, p. 339-344, Levine, J.S. (éd.), Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.

Kurz, W.A., M.J. Apps, T. Webb et P. McNamee, «The Carbon Budget of the Canadian Forest Sector: Phase 1», région du Nord-Ouest de Forêts Canada, rapport d'information d'ENFOR NOR-X-326, 1992.

Lassey, R., D. Lowe, M. Manning et G. Waghorn. «A Source Inventory for Atmospheric Methane in New Zealand and its Global Perspective», *in*: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991.

Lauer, E., mémoire au comité spécial des facteurs d'émission, Énergie, Mines et Ressources, Ottawa (Ontario), 1990.

Lavallee, F. et F. Terrillon, «Air Pollution Emissions and Controls. Adapting MOBILE4 to Model the Canadian Motor Vehicle Fleet and The Use of MOBILE4C for Canadian Emissions Inventories», rapport inédit, Division des systèmes de transport, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), février 1991.

Lawrence, E., «Fuel Consumption Data Book», mémoire technique à Transports Canada, Direction de la sécurité routière, Ottawa (Ontario) 1991.

Levelton, B.H. and Associates, «Methane Emissions from Landfills», rapport préparé pour Environnement Canada, Ottawa (Ontario), juin 1991.

Linak, W.P., J.A. McSorley et R.E. Hall, «Nitrous Oxide Emissions from Fossil Fuel Combustion», communication présentée à l'EPA/EPRI Symposium on Stationary Combustion NO_x Control, San Francisco, Californie, mars 1989.

Manning, M., D.C. Lowe, W.H. Melhuish, R.J. Sparks, G. Wallace et C.A.M. Brenninkmeijer, «The Use of Radiocarbon Measurements in Atmospheric Studies», *in*: *Radiocarbon, 32*: 37-58, 1990.

Marks, L.S., «Standard Handbook for Mechanical Engineers», 8e édition, McGraw-Hill, New York, New York, 1978.

Marland, G., Carbon Dioxide Information Analysis Centre, Oak Ridge Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, communication personnelle, 1992.

Marland, G. et R.M. Rotty, «Carbon Dioxide Emissions from Fossil Fuels: A Procedure for Estimation and Results for 1951-1981», Carbon Dioxide Research Division, Office of Energy Research, Department of Energy des États-Unis, Oak Ridge, Tennessee, DOE/NBB-0036 TR-003, 1983.

Masszi, D.G., et P.J. Proudlock, «Methane from Coal and Its Contribution to the Greenhouse Effect», communication 51, présentée à la 92e réunion annuelle générale du Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Ottawa (Ontario), mai 1990.

Matthews, E. et I. Fung., «Methane Emission From Natural Wetlands: Global Distribution, Area, and Environmental Characteristics of Sources», *in*: *Global Biogeochemical Cycles, 1(1)*: 61-86, 1987.

McCarthy, R.L., F.A. Bower et J.P. Jessen, «The Fluorocarbon-Ozone Theory: I. Production and Release: World Production and Release of CCl_3F and CCl_2F_2 (Fluorocarbons 11 and 12) through 1975», *in*: *Atmospheric Environnement, 11*: 491-497, 1977.

McCubbin, N., «Techniques de base de l'industrie des pâtes et papiers, et ses pratiques de protection environnementales», rapport préparé pour Conservation et Protection, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), rapport SPE 6-EP-83-1F, 1983,

McGuinn, Y.C., «Use of a Landfill Gas Generation Model to Estimate VOC Emissions from Landfills», Radian Corporation, mémoire à S. Thornelor, DPB/OAQPS, juin 1988.

Ministère de l'Énergie de l'Alberta, «Energy-related Carbon Dioxide Emissions in Alberta, 1988-2005», Direction de l'efficacité énergétique, Edmonton (Alberta), 1990.

Moore, T.R. et R. Knowles, «Methane Emissions from Bog and Swamp Peatland in Quebec», *in*: *Biogeochemistry, 11:* 45-61, 1990.

Muzio, L. et J.C. Kramlich, «EPA/IFP European Workshop on the Emission of Nitrous Oxide from Fossil Fuel Combustion», Rueil-Malmaison (France), juin 1988.

Naiman, R.J., T. Manning et C.A. Johnston, «Beaver Population Fluctuations and Tropospheric Methane Emissions in Boreal Wetlands», *in*: *Biogeochemistry, 12:* 1-15, 1991.

National Acidic Precipitation and Assessment Program (NAPAP), «Criteria Pollutant Emission Factors for the 1985 NAPAP Emissions Inventory», Conservation et Protection, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), EPA/600/7-87/015, mai 1987.

National Research Council, «Controlling Airborne Particulates», Committee on Particulate Control Technology, National Research Council des États-Unis, Washington, D.C., 1979.

Norsk Hydro, renseignements communiqués à SFT (Statens Forurensningstilsyn), Oslo, mai 1991.

Office national de l'énergie, «L'énergie au Canada : offre et demande, 1985-2005», Ottawa (Ontario), NE 23-15/1986E, 1986.

Office national de l'énergie, «L'énergie au Canada : offre et demande, 1987-2005», Ottawa (Ontario), NE 23-15/1988E, 1988.

Office national de l'énergie, «L'énergie au Canada : offre et demande, 1990-2005», Ottawa (Ontario), NE 23-15/1991E, 1991a.

Office national de l'énergie, correspondance privée avec M. Francoeur, Office national de l'énergie, Ottawa (Ontario), novembre 1991b.

Okken, P.A. et T. Kram, «CH_4CO_2 Emissions from Fossil Fuels - Global Potential», préparé pour l'atelier de l'IEA/ETSAP, Paris, France, juin 1989.

Okken, P.A. et T. Kram, «Calculation of Actual CO_2 Emissions from Fossil Fuels», communication présentée à l'atelier préparatoire du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, Paris, France, mai 1990.

Orchard, D.F., *Concrete Technology*, vol. 1, Applied Science Publishers Ltd., Londres, Royaume-Uni, 1973.

Organisation météorologique mondiale (OMM), «Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991», WMO/UNDP, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Genève, Suisse, rapport nº 25, 1992.

Organisation des Nations unies (ONU), «World Energy Supplies 1972-1976», Bureau de statistique, Département des affaires économiques et sociales, Organisation des Nations unies, New York, New York, 1978.

Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), «Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks», rapport final de la réunion d'experts de l'OCDE, Paris, France, février 1991.

Ortech, «Compilation of an Ontario Gridded Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Emission Inventory», rapport final au ministère de l'Environnement de l'Ontario, Toronto (Ontario), septembre 1991.

Otto, K., M. Shelef et J.T. Kummer, «Studies of Surface Reactions of Nitric Oxide by Nitrogen-15 Isotope Labeling: The Reaction Between Nitric Oxide and Ammonia over Supported Platinum at 200-250 °C», *in*: *Journal of Physical Chemistry 74*: 2690-2698, 1970.

Pales, J.C. et C.D. Keeling, «The Concentration of Atmospheric Carbon Dioxide in Hawaii», *in*: *Journal of Geophysical Research, 70:* 6053-6076, 1965.

Pêches et Océans Canada, communication personnelle, 1992.

Perry, R.H. et C.H. Chilton, «Chemical Engineers Handbook», 5e édition, McGraw-Hill, New York, New York, 1973.

Picard, D.J., B.D. Ross et D.W.H. Koon, «A Detailed Inventory of CH_4 and VOC Emissions from Upstream Oil and Gas Operations in Alberta», vol. 1, 2 et 3, préparé pour l'Association pétrolière canadienne, Calgary (Alberta), mars 1992.

Power, K., cité *in*: «Growth of Forest In Canada Part II, Quantitative Description of the Land Use and the Mean Annual Increment», Forêts Canada, Ottawa (Ontario), 1989.

Price, W., «Methane Inventory for Landforms in British Columbia», étude effectuée pour B.H. Levelton and Associates par

Talisman Land Resource Consultants, Vancouver (Colombie-Britannique), juin 1991.

Prigent, M. et G. De Soete, «Nitrous Oxide N_2O in Engines Exhaust Gases - A First Appraisal of Catalyst Impact», Society of Automotive Engineers, Technical Paper Series 890492, 1989.

Prigent, M., G. De Soete et R. Doziere, «The Effect of Aging on Nitrous Oxide (N_2O) Formation by Automotive Three-way Catalysts», *in*: *Catalysis and Automotive Pollution Control*, vol. II, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Hollande, 1991.

Quay, P.D., S.L. King, J. Stutsman, D.O. Wilbur, L.P. Steele, I. Fung, R.H. Gammon, T.A. Brown, G.W. Farwell, P.M. Grootes et F.H. Schmidt, «Carbon Isotopic Composition of Atmospheric CH_4: Fossil and Biomass Burning Source Strengths», *in*: *Global Biogeochemical Cycles, 5:* 25-47, 1991.

Radke, L.F., D.A. Hegg, P.V. Hobbs, J.D. Nance, J.H. Lyons, K.K. Laursen, R.E. Weiss, P.J. Riggan et D.E. Ward, «Particulate and Trace Gas Emissions from Large Biomass Fires in North America», *in*: *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*, J.S. Levine (éd.), Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, Massachusetts, 1991.

Ramanathan, V., L. Callis, R. Cess, J. Hansen, I. Isaksen, E. Kuhn, A. Lacis, F. Luther, J. Mahlman, R. Reck et M. Schlesinger, «Climate-chemical Interactions and the Effects of Changing Atmospheric Trace Gases», *in*: *Journal of Geophysical Research, 25*: 1441-1482, 1987.

Robinson, E. et R.C. Robbins, «Emissions, Concentrations and Fate of Gaseous Atmospheric Pollutants», *in*: *Air Pollution Control*, Part II, W. Strauss (éd.), John Wiley and Sons, New York, New York, 1972.

Roche et Associés, «Quantification et prévision des émissions provenant du chauffage résidentiel au bois au Québec», *in*: *Envirobec*, 1983.

Rosland, A., lettre de la Norwegian State Pollution Control Authority - PFC Measurements by Norsk Hydro à A. Jaques, Environnement Canada, octobre 1992.

Rosland, A. et M. Steen, «Klimagass-Regnskap For Norge», *Statens forurensningstilsyn*, Oslo, Norvège, avril 1990.

Rydholm, S.A., «Pulping Processes», Interscience Publishers, 1965.

Schneider, S.H., «The Changing Climate», *in*: *American, 261*, n° 3, septembre 1989.

Smith, R., «The Linkage of Greenhouse Gas Emissions to Economic Activity Using an Augmented Input/Output Model», Statistique Canada, Ottawa (Ontario), 1991.

Statistique Canada, «Bulletin trimestriel, Disponibilité et écoulement d'énergie au Canada (1985)», Ottawa (Ontario), n° 57-003, 1986.

Statistique Canada, «Bulletin trimestriel, Disponibilité et écoulement d'énergie au Canada (1986)», Ottawa (Ontario), n° 57-003, 1987.

Statistique Canada, «Véhicules automobiles, immatriculations (1987)», Ottawa (Ontario), n° 53-219, 1988.

Statistique Canada, «Enquête sur la consommation de carburant», Section des enquêtes sur les dépenses des familles, Ottawa (Ontario), 1990.

Statistique Canada, «Bulletin trimestriel, Disponibilité et écoulement d'énergie au Canada (1990)», Ottawa (Ontario), n° 57-003, 1991a.

Statistique Canada, «Production de pétrole brut et de gaz naturel (1990)», Ottawa (Ontario), n° 26-006, 1991b.

Stewart, B., lettre à A. Jaques, Environnement Canada, sur les dégagements de méthane attribuables aux mines de charbon, septembre 1990.

Stocks, B.J., lettre à W. Kurz de Forêts Canada, mai 1990.

Taylor, S., lettre de Forêts Canada, juin 1990.

Taylor, S., lettre de Forêts Canada, juin 1992.

Terrillon, F., «Air Pollution Emissions and Controls Adapting MOBILE4.1 to Model the Canadian Motor Vehicle Fleet and the Use of MOBILE4.1c for Canadian Emissions Inventories», rapport inédit, Division des systèmes de transport, Environnement Canada, Ottawa (Ontario), 1991.

Thiemens, M.H. et U.C. Trogler, «Nylon Production: An Unknow Source of Atmospheric Nitrous Oxide», *in*: *Science, 251*: 932-934, 1991.

Urban, C.M. et R.J. Garbe, «Exhaust Emissions from Malfunctioning Three-way Catalyst-Equipped Automobiles», Society of Automotive Engineers, Technical Paper 800511, 1980.

Vaghjiani, G.L. et A.R. Ravishankara, «New Measurement of the Rate Coefficient for the Reaction of OH with Methane», *in*: *Nature, 350*: 406-409, 1991.

Vineberg, R. et T. Boyle, «Climate Change and Forests», document de travail préparé pour les négociations canadiennes sur le changement climatique planétaire, Ottawa (Ontario), 1991.

Vitt, D., S. Bayley, T. Jin, L. Halsey, B. Parker et R. Craik, «Methane and Carbon Dioxide Production from Wetlands in Boreal Alberta», département de botanique, Université de l'Alberta, Calgary (Alberta), 1990 (inédit).

Wang, W.C., M.P. Dudek, X.Z. Liang et J.T. Kiehl, «Inadequacy of Effective CO_2 as a Proxy in Simulating the Greenhouse Effect or Other Radiatively Active Gases», *in*: *Nature, 350:* 573-577, 1991.

Wang, W.C., J.P. Pinto et Y.L. Yung, «Climatic Effects due to Halogenated Compounds in the Earth's Atmosphere», American Meteorological Society, MacMillan, 1981.

Wellisch, M., lettre de McMillan Bloedel Ltd. concernant une ébauche de rapport, Vancouver (Colombie-Britannique), juin 1992.

Whalen, M., N. Tanaka, R. Henry, B. Deck, J. Zeglen, J.S. Vogel, J. Southon, A. Shemesh, R. Fairbanks et W. Broecker, «Carbon-14 in Methane Sources and in Atmospheric Methane: The Contribution from Fossil Carbon», *in*: *Science, 245*: 286-290, 1989.

Wilson, S., communication personnelle avec l'Alberta Energy Conservation Board, Calgary (Alberta), mars 1990.

Wuebbles, D.J. et J. Edmonds, «A Primer on Greenhouse Gases», Department of the Environment des États-Unis, Washington, D.C., 1987.

Zimen, K.E., P. Offermann et G. Hartman, «Some Functions of CO_2 and Future CO_2 Burden in the Atmosphere», *in*: *Z. Naturforsch., 32A*: 1544-1554, 1977.